

Verfahrenstechnische Untersuchungen zum Betriebsverhalten statischer Rotterektoren

Von der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

von

Dipl.-Ing. Kay Weichelt
geb. am 29.10.1984 in Dresden

Tag der Einreichung: 11. März 2016

Tag der Verteidigung: 22. März 2019

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. N. Mollekopf
	Prof. Dr.-Ing. habil. C. Dornack
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lange

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Dresden. Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Mollekopf danke ich für seine Unterstützung als Lehrstuhlinhaber und betreuender Hochschullehrer.

Für die Übernahme der Gutachten danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Mollekopf und Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack.

Die Arbeit ist das Ergebnis umfangreicher Untersuchungen an abfallwirtschaftlichen Anlagen. Durch die Bearbeitung des Themas hatte ich die Möglichkeit, eine Vielzahl verfahrenstechnischer Werkzeuge praktisch anwenden zu können und die Denkweise zur Durchdringung komplexer Prozessketten auszubauen.

An dieser Stelle bedanke ich mich herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Joachim Brummack für die wissenschaftliche Betreuung. Seine umfangreichen Erfahrungen und die vielen fachlichen Anregungen und Diskussionen haben ebenso wie seine tatkräftige Unterstützung bei der Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ich danke allen ehemaligen Studierenden, die durch ihre Studienarbeit, Diplomarbeit oder als studentische bzw. wissenschaftliche Hilfskraft unmittelbar an der Arbeit mitgewirkt haben. Herausheben möchte ich Dipl.-Ing. Sebastian Wanka, Dipl.-Ing. Liwei Mu, Dipl.-Inf. Dipl.-UVT Matthias Umbach und Dipl.-Ing. Jens Saczinski.

Danken möchte ich auch meiner Familie, die mich auf meinem Weg stets unterstützt hat.

Inhalt

Inhalt.....	i
Nomenklatur	iv
Begriffsbestimmung	vi
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Zielstellung	3
1.3 Struktur der Arbeit	4
2 Aerobe biologische Abfallbehandlung	6
2.1 Ingenieurtechnische Grundlagen zum biologischen Abbau.....	6
2.2 Entwicklung der technologischen Nutzung.....	10
2.3 Einordnung in das System der Abfallwirtschaft	12
2.4 Technologische Konzepte aerober Restabfallbehandlung	14
3 Problemanalyse zum statischen Rotterektor	18
3.1 Idealer statischer Rotterektor	18
3.2 Realer statischer Rotterektor	20
3.3 Schlussfolgerung	22
4 Stand des Wissens zum statischen Rotterektor	23
4.1 Durchströmung	23
4.1.1 Durchströmbarkeit	23
4.1.2 Charakterisierung von Rottegut	27
4.1.3 Haufwerksstruktur.....	32
4.2 Wärmehaushalt	36
4.3 Wasserhaushalt.....	39
4.4 Prozessführung	44

5	Experimentelle Untersuchungen	49
5.1	Verfahrensbeschreibung der MBA-Anlage	49
5.2	Randbedingungen	55
5.3	Untersuchungsprogramm	56
5.4	Messmethoden und Messtechnik	58
5.4.1	Durchströmbarkeit und Setzungsverhalten	58
5.4.2	Örtliche Temperatur und Gaszusammensetzung	62
5.4.3	Differenzdruck	66
6	Zustand und Verhalten des Stoffsystems	68
6.1	Einleitung	68
6.2	Durchströmbarkeit Rottegut	70
6.2.1	Spezifischer Durchströmwiderstand von Rottegutchargen	70
6.2.2	Wirkung von Setzungsverhalten, Schüttdichte und Wassergehalt	72
6.2.3	Einfluss der physikalischen Aufbereitung	76
6.3	Durchströmung Rotteguthaufwerk	78
6.3.1	Heterogenität von Rottegut	78
6.3.2	Varianten der Reaktorbeschickung	79
6.3.3	Heterogenität im Haufwerk	82
6.3.4	Randgängigkeit	87
6.3.5	Böschungen	89
6.3.6	Wirkung einer Materialumsetzung	92
6.4	Wassergehalt	97
6.4.1	Charakterisierung	97
6.4.2	Erhöhung Anfangswassergehalt	99
6.4.3	Bewässerung während des Rotteprozesses	102
7	Wirkung der Prozessführung	104
7.1	Einleitung	104
7.2	Luftmanagement	105
7.2.1	Betrachtungsraum Reaktor	105
7.2.2	Betrachtungsraum Anlage	111
7.3	Prozessüberwachung	115
7.3.1	Örtliche Temperaturmessung durch Stecherthermometer	115
7.3.2	Messwerte in der Zuluft und Abluft	118
7.4	Prozessregelung	119

8	Diskussion	123
8.1	Überblick zu den Problemen statischer Rottoreaktoren	123
8.2	Bewertung des Prozesszustandes	125
8.3	Überblick zur Ertüchtigung in Betrieb befindlicher Anlagen	130
8.4	Ertüchtigung mit wenigen Umbauten	133
8.4.1	Abbau der Heterogenität des Rottegutes	133
8.4.2	Verbesserung der Rottefähigkeit	136
8.4.3	Begegnung der Randgängigkeit im Reaktor	140
8.4.4	Anpassung der Schütthöhe	144
8.4.5	Außerbetriebnahme der Umluftleitung	145
8.4.6	Installation zusätzlicher Zentralventilatoren und Drucksensoren	146
8.4.7	Anpassung der Prozessregelung	147
8.5	Ertüchtigung mit größeren Umbauten	148
8.5.1	Begegnung der Heterogenität im Reaktor	148
8.5.2	Umbau der Art der Reaktorbeschildung	150
8.5.3	Trennung der Rottoreaktoren von den Sammelleitungen	152
8.6	Anforderungen an die Gestaltung neuer Anlagen	153
9	Zusammenfassung und Ausblick	157
	Literaturverzeichnis	161
	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	168
	Anhang	173
A.1	Dokumentation zur Messtechnik	173
A.2	Wassergehalt	174
A.3	Randgängigkeit	174
A.4	Luftmanagement	175
A.5	Auswertung Betriebsdaten	176
A.6	Übersicht Untersuchungen	179

Nomenklatur

Abkürzung	Bedeutung
AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
AbfG	Abfallgesetz
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AL	Abluft
ATP	Adenosintriphosphat
AZV	Abfallzweckverband
Bel.	Belüftung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
DepV	Deponieverordnung
DME, DMP	Druckmessung Einzeltunnel, Paralleltunnel
DN	Nennweite
DS	Durchströmung
EBS	Ersatzbrennstoff
Ew	Einwohner
FL	Frischluf
FU	Frequenzumrichter
GA	Gasanalyse
HD-PE	High Density Polyethylen
KG-Rohr	Kanalgrundrohr
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
L	Leitung
M	Merkmal
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlung
MBS	Mechanisch-biologische Stabilisierung
ML	Mischluft
MPS	Mechanisch-physikalische Stabilisierung
PA	Polyamid
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PVC	Polyvinylchlorid
R	Raum
RG	Rottegut
RTO	Regenerativ-Thermische Oxidation
S	Stecherthermometer
SL	Sammelleitung
T	Tunnel
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TM	Temperaturmessung
UL	Umluft
ZL	Zuluft

Symbol	Einheit	Bedeutung
ρ	kg/m ³	Dichte
η	Pa·s	Dynamische Viskosität
φ	%	Relative Luftfeuchtigkeit
α	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient
ϑ	°C	Temperatur
$\varepsilon, \varepsilon_L$	Vol.-%	Porosität, Luftporenvolumen
Δh_v	J/kg	Verdampfungsenthalpie
Δp	Pa	Druckverlust
\dot{Q}	J/s	Wärmestrom
\dot{V}	m ³ /h	Volumenstrom
A	m ²	Fläche
aoTS	Ma.-%	Abgebaute organische Trockensubstanz
AT ₄	mg _{O2} /g _{TS}	Atmungsaktivität (spezifischer Sauerstoffverbrauch) nach 4 Tagen
c	mol.-%	Stoffmengenkonzentration
c_p	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
DOC	mg/l	Gesamter gelöster organischen Kohlenstoff (engl.: dissolved organic carbon), auch TOC im Eluat
d_p	m	Sauterdurchmesser
E	Pa	Elastizitätsmodul
F_G	kg·m/s ²	Gravitationskraft
GB ₂₁	l/kg _{TS}	Gasbildungsrate im Gärttest innerhalb von 21 Tagen
h	J/kg	Spezifische Enthalpie
H	m	Höhe
$H; \dot{H}$	J; W	Enthalpie; Enthalpiestrom
k	1/m	Wachstumskonstante
K	m ²	Durchlässigkeit/Permeabilität
k_f	m/s	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
m	kg	Masse
n	1/s	Drehzahl
N	mol	Stoffmenge
oS	Ma.-%	Organische Substanz
oTS	Ma.-%	Organische Trockensubstanz
p	Pa	Druck
R_{ges}	Pa·s/m	Durchströmwiderstand
R_L	Pa·s/m ²	Spezifischer Durchströmwiderstand
t	s	Zeit
T	K	Absolute Temperatur
TOC	Ma.-%	Gesamter organischer Kohlenstoff (engl.: total organic carbon)
TS	Ma.-%	Trockensubstanz
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
V	m ³	Volumen
x	Ma.-%	Wassergehalt
z	m	Längenkoordinate

Tiefgestellter Index	Bedeutung
0	Zum Zeitpunkt $t=0$
bio	Biologisch
ein	Eintritt
f	Bezogen auf die Feuchtmasse
ges	Gesamt
i	Komponente
L	(Feuchte) Luft
max	Maximal
o	Oben
P	Partikel
Q	Querschnitt
Sch	Schüttung
sp	Speicher
tr	Bezogen auf die Trockenmasse
trL	Trockene Luft
u	Unten
verl	Verlust
W	Wasser

Begriffsbestimmung

Begriff	Bedeutung
Durchströmbarkeit	Eigenschaft von Rottegut, anströmende Luft hindurch zulassen
Falschlufteintrag	Unkontrollierbarer Eintrag von Abluft in den Zuluftstrom eines Rottereaktors
Heterogenität	Verschiedenheit eines Stoffsystems in der Makroebene
Makroebene	Betrachtungsebene vom Partikel aufwärts, so dass die Bedingungen durch physikalische Eigenschaften vorgegeben werden
Restabfall	Unterart der festen Siedlungsabfälle aus Haushalten, Geschäften und öffentlichen Flächen/Gebäuden, die über die kommunale Müllabfuhr entsorgt werden
Rotte	Technologische Nutzung des aeroben biologischen Abbaus
Rottegut	Material (Stoffsystem) in einem Rotteprozess
Rotteguthaufwerk	Schüttung aus Rottegut
Rotteprozess	Zeitlicher Ablauf einer Rotte
Rottereaktor	Apparat/Bauwerk zur Realisierung eines Rotteprozesses
Vorzugsströmung	Luftströmung mit erhöhter Flussdichte in Haufwerksbereichen als Folge guter Durchströmbarkeit

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Abfallwirtschaft kann erhebliche Beiträge zum Umweltschutz, insbesondere zum Ressourcenschutz, leisten. Konkrete Ansätze für Abfälle sind:

- Vorbereitung zur Wiederverwendung
- Verwertung durch stoffliche Nutzung (Recycling)
- Sonstige Verwertung, z.B. durch energetische Nutzung
- Umweltverträgliche Beseitigung der Restabfälle

Diese Ansätze werden in der europäischen und deutschen Gesetzgebung durch eine Hierarchie in der aufgeführten Rangfolge vorgeschrieben¹. Wesentliche Aspekte sind an erster Stelle eine Reduzierung der anfallenden Abfallmengen durch eine Abfallvermeidung und nachfolgend eine Wandlung der Abfallwirtschaft von der reinen Entsorgungswirtschaft zur Kreislaufwirtschaft. Merkmal dieser Begrifflichkeit ist eine stoffstromorientierte Betrachtung mit dem Ziel einer möglichst hochwertigen und weitgehenden Verwertung der anfallenden Abfälle zur Schonung der natürlichen Ressourcen. Die verbreitet eingesetzten technologischen Konzepte werden diesem Ziel bei der Behandlung bestimmter Abfälle nicht gerecht.

Während gewerbliche Abfälle aus Industrie und Handwerk aufgrund ihrer Zusammensetzung bereits größtenteils für eine Verwertung genutzt werden, bieten häusliche und mit ihnen gemeinsam erfasste Geschäftsabfälle noch Potentiale. Solche Abfälle sind in ihrem Stoffspektrum durch relevante Mengen biogener Komponenten gekennzeichnet. Diesen Komponenten kommt in Form von getrennt erfasstem Material (Bioabfall) oder als permanente Fraktion der Restabfälle eine besondere Bedeutung zu. Sie schränken die Lagerfähigkeit durch ihre biologische Aktivität ein, sind entscheidend für den Wassergehalt eines Abfalls und führen durch ihre Fähigkeit zur Bindung an Feststoffpartikel und ihren rheologischen Eigenschaften zur Minderung der Qualität von potentiell im Stoffsystem enthaltenen Wertstoffen.

Für Bioabfall führten diese Gründe und die sehr gute Eignung für eine stoffliche oder stofflich-energetische Verwertung mit der Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) im Mai 2013 zur Pflicht einer Getrenntsammlung ab 1. Januar 2015². Zur Verwertung werden

¹ Vgl. die EU-Abfallrahmenrichtlinie vom 19. November 2008 [AbfRRL, 2008] und die deutsche Umsetzung als Kreislaufwirtschaftsgesetz (Inkrafttreten am 01. Juni 2012) [KrWG, 2012]

² Mit der Einschränkung, dass „Die Pflicht zur Verwertung von Abfällen [...] zu erfüllen [ist], soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.“ [KrWG, 2012]

die natürlichen biochemischen Abbauprozesse der biogenen Komponenten technologisch genutzt und entweder unter aeroben Bedingungen (Sauerstoff mikrobiell verfügbar) eine Kompostierung oder unter anaeroben Bedingungen (kein Sauerstoff verfügbar) eine Vergärung realisiert. Auch eine Kombination der Verfahren ist möglich.

Die technisierte Kompostierung wurde in Deutschland in den 1980er Jahren verbreitet eingeführt und leistet bis heute durch die Rückführung von Nährstoffen und die Erzeugung von Bodenverbesserern einen wichtigen Beitrag zum Ressourcenschutz und zur Schließung des natürlichen Stoffkreislaufes. Zunehmend erfolgte ein Übergang zu Großanlagen, was zu einem stetig steigenden Energieverbrauch und anlagentechnischen Aufwand führte. Ursache ist der biologische Prozess, der als eine flammenlose enzymatische Teilverbrennung charakterisiert werden kann. Die freigesetzte biogene Wärme kann nicht durch freie Konvektion, sondern nur durch Belüftungssysteme abgeführt und kaum genutzt werden. Dadurch bleibt das in den biologisch leicht abbaubaren Substanzen enthaltene Energiepotential ungenutzt und es wird zusätzlich Elektroenergie verbraucht. Der energetische Aufwand reduziert sich durch eine der aeroben Behandlung vorgeschaltete Methangärung, bei welcher die leicht abbaubaren Substanzen anaerob zu dem regenerativen Energieträger Biogas abgebaut werden. Der verbliebene Gärrest wird einer Kompostierung zugeführt, welche aufgrund des geringeren Energiepotentials des Gärrestes prozessseitig einfacher zu führen ist und einen verwertbaren Gärkompost hervorbringt.

Restabfälle lassen durch ihre komplexe Zusammensetzung und aus ökologischen Gründen keine direkte stoffliche Verwertung zu. Um den Vorgaben des KrWG zu entsprechen, besteht die Aufgabe in einer Stoffstromtrennung mit der Behandlung und Verwertung von Teilströmen. Eine Deponierung unbehandelter Restabfälle ist durch die Abfallablagerversordnung (AbfAbIV)³ seit 1. Juni 2005 ausgeschlossen. Eine Behandlung soll sicherstellen, dass es in der Deponie nicht zu einem unkontrollierten Abbau der im Abfall enthaltenen biologisch abbaubaren Komponenten kommt. Die Entstehung von Methan und von Schadstoffen sowie negative Auswirkungen auf die Standsicherheit und Abdichtung der Deponie sollen verhindert werden. Dazu wurden vom Gesetzgeber entsprechende Ablagerungsparameter festgelegt. Eine kostengünstige und flexible Möglichkeit zur Restabfallbehandlung stellen mechanisch-biologische Verfahren dar, welche etwa seit der Jahrtausendwende in Deutschland verstärkt Anwendung finden. Hinsichtlich der Nutzung biochemischer Prozesse wurden hierfür rein aerobe und kombiniert anaerob-aerobe Verfahren technisch realisiert. Die Stoffstromtrennung erfolgt durch eine Fraktionierung des Restabfalls in verwertbare Teilströme (Wertstoffe und Ersatzbrennstoff) und nicht verwertbare, zu beseitigende Teilströme (Reststoffe).

Das überwiegend genutzte technologische Anlagenkonzept für die rein aeroben mechanisch-biologischen Verfahren und für die Kompostierung ist der statische Rotteraktor. Merkmal des Konzeptes ist das Festbett mit technisch intensivierter Belüftung. Im Rotteprozess liegen aufgrund der Belüftung Bedingungen vor, die den aeroben Prozess zum dominierenden Pro-

³ Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen, Inkrafttreten am 01. März 2001, Außerkrafttreten am 16. Juli 2009. Teilweise Übernahme in die Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung), Inkrafttreten am 16. Juli 2009 [DepV, 2009]

zess werden lassen. Ausschlaggebend für die Konzeptwahl waren weniger prozesstechnische als vor allem ökonomische Gründe, weil sich die Reaktoren durch einen relativ einfachen Aufbau auszeichnen. Der Einsatz des Konzeptes bei den mechanisch-biologischen Verfahren begründet sich zudem darauf, Erfahrungen aus ihrem Einsatz in der Kompostierung nutzen zu können. Der Einsatz gestaltet sich in der Realität schwierig, weil ein Festbett für einen regelgerechten Betrieb klar definierte Anforderungen an die Eigenschaften zeigen muss. Das dazu notwendige Wissen ist in der chemischen Industrie vorhanden, wo das Konzept ein breites Anwendungsfeld hat. Aus verfahrenstechnischen Gesichtspunkten ist die Homogenität des Festbetts die entscheidende Voraussetzung für eine regelgerechte Funktion. Sie ist bei Rottegut der Kompostierung und besonders bei aus Restabfällen erzeugten Fraktionen nicht im erforderlichen Maß zu erreichen.

Für den Prozess hat dieser Umstand weitreichende Auswirkungen. Beim Betrieb kommt es zu teilweise beträchtlichen und zufällig streuenden Abweichungen vom erwünschten Verhalten. Dies äußert sich in geringen Abbauraten mit großer Schwankungsbreite und erheblichen Gradienten innerhalb des Materials, Geruchsproblemen, flüssigen Emissionen sowie hohen Betriebskosten. Für eine Verbesserung sind eine umfangreiche Analyse der vorliegenden Situation und eine prozesstechnische Durchdringung der ablaufenden Vorgänge notwendig. Bislang liegen für Großanlagen hierzu nur ungenügende Kenntnisse vor.

1.2 Zielstellung

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit stehen Untersuchungen zum Betriebsverhalten statischer Rottereaktoren großtechnischer Anlagen. Die Bedingungen und Vorgänge im Reaktor und in seiner Peripherie sollen untersucht werden, womit im Wesentlichen folgende Zielstellungen verbunden sind:

1. Analyse der Wirkungen prozessrelevanter Einflussfaktoren
2. Identifikation prozesstechnischer Probleme statischer Rottereaktoren
3. Ableitung von Möglichkeiten und Grenzen für einen verbesserten Betrieb bestehender Anlagen und von Lösungen für zukünftige Anlagen

Um alle signifikanten Einflüsse aufzudecken, stellt die Analyse einer typischen in Betrieb befindlichen Anlage die einzige aussichtsreiche Methodik dar. Die Untersuchungen erfolgten an einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage (MBA-Anlage).

Als Defizit der aktuellen Situation der MBA-Technologie ist festzustellen, dass insbesondere biochemische Aspekte zum Stoffsystem im Vordergrund standen. Die integrale prozesstechnische Durchdringung wurde nur ungenügend thematisiert. Angesichts der großen Bedeutung für den biologischen Prozess wurde eine Vielzahl mikrobieller oder laboranalytischer Untersuchungen durchgeführt, weshalb in der Literatur hierzu viele Informationen vorliegen. Allerdings sind Zugriffsmöglichkeiten auf biochemische Aspekte an Großanlagen begrenzt nutzbar und die biologischen Prozesse werden durch andere Aspekte beeinflusst. Beeinflussungen und Anforderungen resultieren aus den physikalischen Eigenschaften des Stoffsystems und aus der Behandlung in einer technischen Anlage. Im Zentrum der Arbeit stehen

deshalb verfahrenstechnische Betrachtungsweisen und die Bedingungen in der Makroebene. Die Bedingungen des Stoffsystems sind mit den apparate- und prozesstechnischen Aspekten des technischen Systems zu verknüpfen.

Es wird folgende Vorgehensweise verfolgt:

- Identifikation der das Betriebsverhalten bestimmenden Einflussfaktoren, deren Ursachen und Wirkungen
- Entwicklung experimenteller Methoden zur Bewertung der Einflussfaktoren
- Anwendung der Methoden zur Beschreibung des Betriebsverhaltens im Istzustand und im modifizierten Anlagenzustand
- Identifikation prozesstechnischer Probleme
- Ableitung und Bewertung von Maßnahmen für eine optimierte Betriebsweise bestehender und von Anforderungen an die konstruktive Gestaltung neuer Anlagen

Ziel der Untersuchungen ist es, die Bedingungen und Vorgänge im Reaktor und in seiner Peripherie zu analysieren und Lösungen für die auftretenden Probleme in Betrieb befindlicher Anlagen zu erschließen. Die Lösungen müssen in die vorhandene Anlagentechnik integrierbar und ökonomisch tragbar sein. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, die Verfügbarkeit der Anlagen zu erhöhen, die Prozessziele definierter erfüllen zu können und die Betriebskosten zu senken. Die Ergebnisse lassen sich darüber hinaus für die Entwicklung neuer, besser geeigneter Anlagenkonzepte nutzen.

1.3 Struktur der Arbeit

Im Kapitel 2 erfolgt eine Einführung in die aerobe biologische Abfallbehandlung, wobei zunächst die notwendigen ingenieurtechnischen Grundlagen zum biologischen Abbau erläutert werden. Anschließend wird die Entwicklungsgeschichte der technologischen Nutzung beschrieben und eine Einordnung in das System der Abfallwirtschaft in Deutschland vorgenommen. Zum Schluss werden die technologischen Konzepte zur aeroben Restabfallbehandlung als Überblick vorgestellt.

Inhalt von Kapitel 3 ist eine Problemanalyse zum statischen Rottereaktor. Aus ingenieurtechnischer Sichtweise werden zunächst die Merkmale eines idealen Reaktors erläutert, um die geforderten Aufgaben lösen zu können. Anschließend werden die prozessrelevanten Abweichungen eines realen Reaktors diskutiert.

Ergebnis der Problemanalyse ist eine Systematisierung von für das Betriebsverhalten der Reaktoren relevanten Aspekten. Die Aspekte sind anschließend durch eine Literaturrecherche zum Stand des Wissens zu untersuchen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt. Aufgrund der Analogie der biologischen Prozesse werden bei fehlenden Informationen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung Quellen der Kompostierung mit einbezogen.

Aufgrund der Bedingungen und Vorgänge im Rottereaktor und in dessen Peripherie sind typische Methoden wie eine Stoff- und Wärmebilanzierung auf der Basis von vorliegenden Betriebsdaten nicht nutzbar. Damit können Ergebnisse theoretischer Betrachtungen nicht

oder nur eingeschränkt auf die reale Anlage übertragen werden. Es besteht entweder keine Möglichkeit, die für eine Verifizierung erforderlichen Daten zu ermitteln oder die verfügbaren Daten sind nicht zur Beschreibung geeignet. Zudem macht die Heterogenität des Stoffsystems und die Vielzahl an Beeinflussungen vor und während des Rotteprozesses eine experimentelle Untersuchung durch Analyse einer typischen in Betrieb befindlichen Anlage notwendig. Das Kapitel 5 beschreibt die Anlage, die Randbedingungen zur Durchführung von Untersuchungen und das Untersuchungsprogramm. Die zur Untersuchung des Betriebsverhaltens geeigneten Messmethoden und die entwickelte Messtechnik werden dargestellt.

Das Betriebsverhalten statischer Rottereaktoren wird von einer Vielzahl an Faktoren bestimmt, wobei eine Unterscheidung in Einflüsse durch das Stoffsystem und durch Wirkungen der Prozessführung möglich ist. Der Zustand und das Verhalten des Stoffsystems wird in Kapitel 6 beschrieben. Die Wirkungen der Prozessführung sind Inhalt von Kapitel 7. Der Einfluss der Faktoren und enthaltener Elemente wird zunächst vom theoretischen Hintergrund abgeleitet. Die theoretisch analysierten Wirkungen auf das Betriebsverhalten werden dann, wenn möglich, anhand experimenteller Untersuchungsergebnisse und der Auswertung von an den Anlagen verfügbaren Betriebsdaten nachgewiesen. Aufgrund der Komplexität der Einflüsse sind für manche Aspekte nur qualitative Aussagen möglich.

Inhalt von Kapitel 8 ist eine Diskussion der dargestellten Zusammenhänge und die Ableitung von Schlussfolgerungen. Zunächst erfolgt eine zusammenfassende Darstellung zu den Problemen bestehender statischer Rottereaktoren. Anschließend wird die Eignung verbreiteter eingesetzter Methoden zur Bewertung des Prozesszustandes diskutiert. Es folgt eine Diskussion zu den realisierbaren Maßnahmen einer Ertüchtigung von in Betrieb befindlichen Anlagen. Hieraus abzuleitende Anforderungen an die Gestaltung neuer Anlagen werden abschließend formuliert.

Kapitel 9 enthält die Zusammenfassung der Ergebnisse und Vorschläge für ein weiteres Vorgehen.

2 Aerobe biologische Abfallbehandlung

2.1 Ingenieurtechnische Grundlagen zum biologischen Abbau

Die natürlichen biologischen Abbauprozesse nativ-organischer Substanz werden bei der biologischen Abfallbehandlung zielgerichtet technologisch genutzt. Die Abbauprozesse sind Bestandteil im natürlichen Stoffkreislauf der Ökosysteme, welcher durch die Sonne als Energiequelle angetrieben wird. Die Abb. 2-1 zeigt eine vereinfachte Darstellung.

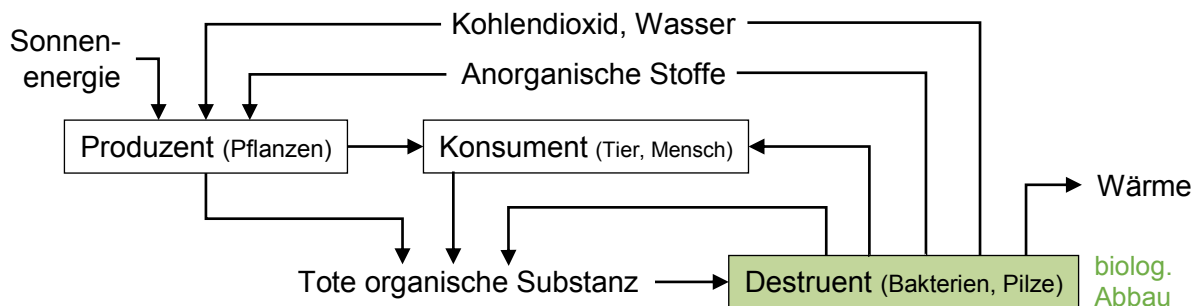


Abb. 2-1: Vereinfachte Darstellung des natürlichen Stoffkreislaufes

Technologisch genutzt wird die Arbeit der Destruenten. Diese verwerten tote organische Substanz und betreiben hierdurch ihren eigenen Stoffwechsel (Metabolismus). Sie zerlegen die Substanz im Katabolismus (Betriebsstoffwechsel) in ihre anorganischen Grundbausteine und die Verbindungen Kohlendioxid und Wasser unter Bildung von Energie in chemischer Form (ATP - Adenosintriphosphat) sowie als Wärme. Beim Anabolismus (Baustoffwechsel) erfolgt aus den Bausteinen der Aufbau neuer Zellsubstanz/Biomasse, wozu Energie in Form des ATP benötigt wird [Fritsche, 1990].

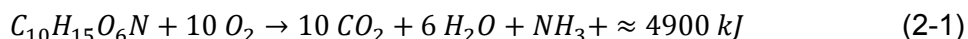
Bei mechanisch-biologischen Verfahren der Abfallbehandlung stellt der biologische Abbau den stoffwandelnden Schritt für die nicht verwertbaren Komponenten der Abfälle dar. Die Ablagerungskriterien müssen erreicht werden, um der Zielstellung solcher Konzepte zur Reduzierung des Gefährdungspotenzials der abzulagernden Fraktion zu entsprechen. Die biologischen Behandlungsstufen sind damit der Kern jeder MBA-Anlage, da hierfür im Gegensatz zur Qualität der Ersatzbrennstoffe und weiterer Wertstoffe durch den Gesetzgeber kein Spielraum gelassen wird.

Der biologische Abbau stellt einen enzymatisch katalysierten biochemischen Prozess mit parallel oder nacheinander ablaufenden bzw. ineinandergreifenden Einzelprozessen dar. Er ist von Mikroorganismen (insbesondere Bakterien und Pilze) und anderen niederen Lebewesen (insbesondere Würmer) getragen [Kämpfer, 2001]. Die Mikroorganismen haben alle

Räume der Erde besiedelt und damit zu Lebensräumen gemacht. Bezüglich der Bedingung Sauerstoff existieren folgende Lebensweisen, die von Mikroorganismen genutzt werden [Fritsche, 1990]:

- Aerob im sauerstoffreichen Milieu
- Anaerob bei sauerstofffreien Bedingungen
- Microaerophil bei einem niedrigen Sauerstoffpartialdruck

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die technologische Nutzbarmachung des aeroben Abbauprozesses. Unter diesen Bedingungen bestehen hinsichtlich der Abbaubarkeit Unterschiede zwischen den typischen im Restabfall enthaltenen nativ-organischen Substanzen. Zucker, Stärke und Eiweiße sind leicht abbaubar, Cellulose, Wachse und Öle sind mittelschwer abbaubar, Lignin und Harze sind schwer abbaubar und Leder, Gummi und Kunststoffe nicht/kaum unter aeroben Bedingungen abbaubar [Janikowski & Wiegel, 1993]. Der biologische Abbau der Kohlenstoffquellen stellt eine mikrobielle Oxidation dar und lässt sich theoretisch als Reaktionsgleichung abbilden. Alle bekannten Ansätze für Haushaltsabfälle besitzen denselben Aufbau und zeigen nur Unterschiede bei den stöchiometrischen Koeffizienten der enthaltenen chemischen Elemente. Das Molverhältnis C:H:O für die Summenformeln ist ähnlich, nur die Angaben zum Stickstoff weichen um fast das Zehnfache ab. Beispielhaft ist die Formel von [Paar, 2000] zu nennen:



Der aerobe biologische Abbau ist ein exothermer Prozess. Beim aeroben Abbau von Glucose wird etwa 60 % der gebildeten Energie in Form von Wärme freigesetzt. Der Rest ist als ATP energetisch verwertbar [Kutzner & Jäger, 1994]. Dies führt zu einer Erwärmung des Rottegutes und dem Durchlaufen von Temperaturniveaus, wobei sich das Artenspektrum der Population ändert. Hinsichtlich der dominierenden Mikroorganismen und ihren Temperaturbereichen lässt sich folgende Einteilung treffen [Hupe et al., 2000]:

- psychrophile Mikroorganismen: -4 bis 20 °C, insb. Bakterien und Schimmelpilze
- mesophile Mikroorganismen: 15 bis 42 °C, insb. Bakterien und Actinomyceten
- thermophile Mikroorganismen: 45 bis 75 °C, insb. Bakterien und mesophile Sporen

Der Übergang von einer zur anderen Mikroorganismenart erfolgt nicht stetig. Die Wachstumsrate nimmt jeweils mit steigender Temperatur zu, erreicht ein Maximum und sinkt anschließend auf den Wert Null. Das Maximum der Wachstumsrate liegt jeweils innerhalb der genannten Temperaturbereiche, so dass sich am Übergang der Populationsbereiche ein Wachstums- und damit Aktivitätsminimum ausbildet, welches zu verminderter Wärmefreisetzung führt. Im Haufwerk ist dieser Umstand anhand der Temperatur meist nicht sichtbar, weil bei größeren Rottegutmengen örtlich eine Vielzahl an verschiedenen Prozessbedingungen existiert, die in Summe den Effekt überdecken [Niese, 1959]. Der ideale, durch technische Eingriffe nicht gestörte Rotteprozess lässt sich bezüglich des Temperaturverlaufs über der Rottedauer in vier Phasen gliedern. In der Abb. 2-2 sind die Phasen und zugleich der pH-Wert darstellt.

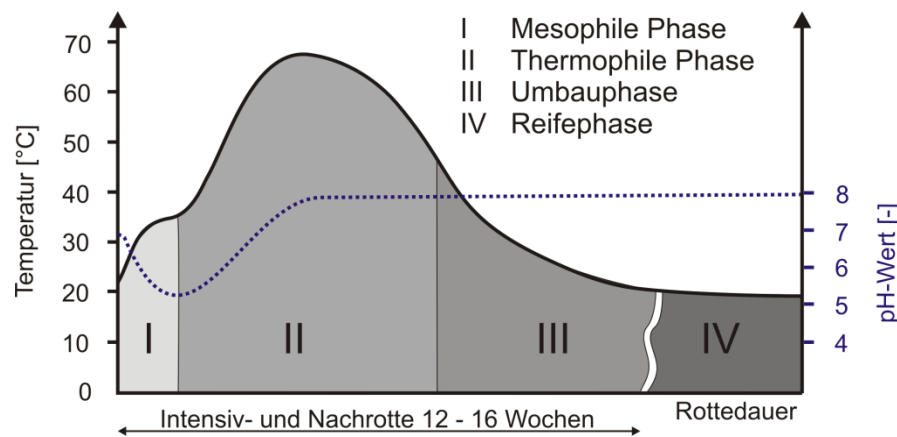


Abb. 2-2: Idealer aerober biologischer Abbau: Temperaturverlauf samt Einteilung in Phasen und pH-Wert-Verlauf über der Rottedauer, nach [Brummack, 2015]

Die mesophile Phase ist durch eine starke Entwicklung der im Ausgangsmaterial enthaltenen mesophilen Mikroorganismen und eine starke Wärmefreisetzung durch Umsetzung der leicht abbaubaren Substanzen gekennzeichnet. Mit zunehmender Erwärmung verschiebt sich die Population in Richtung thermophiler Mikroorganismen. Die thermophile Phase weist einen hohen Stoffumsatz auf, wobei die Aktivität durch Verknappung der leicht abbaubaren Substanzen verringert oder durch zu hohe Temperaturen gestört wird. Beide Fälle sind durch eine geringere Wärmefreisetzung und folglich abnehmende Temperaturen gekennzeichnet. Eine Bewertung der Aktivität lassen diese Effekte nicht immer zu, weil die Temperatur auch Folge der Wärmespeicherung im Haufwerk ist. Nur eine Orientierung an der verbrauchten Sauerstoffmenge oder der freigesetzten Kohlendioxidmenge ermöglicht entsprechende Aussagen. Mit der Temperaturabnahme wird die Population in den mesophilen Bereich (Umbauphase) verschoben, in welchem die schwer abbaubaren Substanzen umgesetzt werden. Die am Ende stehende Reifephase ist durch die Mineralisierung und die Bildung von Huminstoffen gekennzeichnet, durch eine Prozesssteuerung nicht mehr beeinflussbar und kein Bestandteil der Prozesskette in technischen Anlagen.

Bei bioabfallreichen Mischungen treten anfangs niedrige pH-Werte im Rottegut auf. Ursache ist die hohe Verfügbarkeit von leicht abbaubaren Substanzen mit der resultierenden vermehrten Freisetzung organischer Säuren und von CO_2 . Der fortschreitende Abbau der energiereichen Substanzen und der Säuren sowie die Freisetzung von Ammoniak führen später zu einer Anhebung des pH-Werts in den für die Population günstigen neutralen Bereich [Weißbart et al., 2001]. Niedrige Werte können den Kohlenstoffabbau und die Wärmefreisetzung verzögern [Krogmann, 1994].

Das breite Artenspektrum an Mikroorganismen und die Enzyme als biochemische Katalysatoren der Abbauprozesse bilden sich im Stoffsystem selbst aus. Hieraus resultiert eine Vielzahl verschiedener, nicht beschreibbarer Einzelreaktionen. Bei der technologischen Anwendung der biologischen Prozesse muss ein vorhandenes, in sich organisiertes und selbstregulierendes System genutzt werden, welches aus einer unter den jeweiligen Bedingungen stabilen Population verschiedener Lebewesen besteht. Es sind daher Bedingungen zu schaffen, unter denen das System in gewünschter Weise arbeitet. Für die Behandlung realer Stoffsysteme und speziell für eine MBA ist dies eine Herausforderung.

Ausgangspunkt der Überlegungen ist ein Modellpartikel als Bestandteil des Haufwerkes. Die Partikel bestehen nicht nur aus einer stofflichen Komponente, sondern sind aus einer Vielzahl verschiedener solcher originären Primärpartikel aufgebaut. Ursache ist die Beeinflussung des Stoffsystems in der gesamten Prozesskette von der Anlieferung an die Anlage über die Aufbereitung bis zur Reaktorbeschickung. Diese Partikel stellen ein Agglomerat und bezüglich der Struktur ein Teilchen, ein sogenanntes Sekundärpartikel, dar. Die Abb. 2-3 zeigt ein Sekundärpartikel und vereinfacht den Stofftransport in einer solchen Struktur.

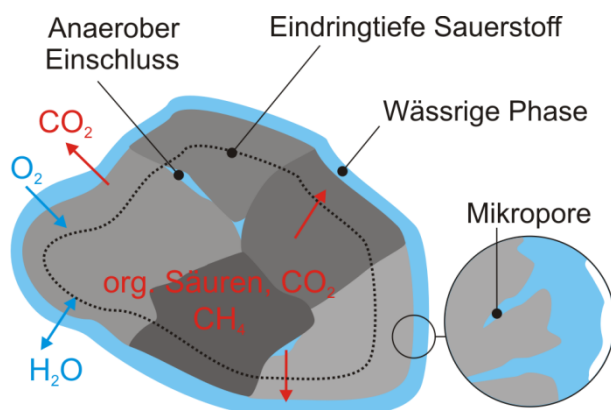


Abb. 2-3: Stofftransport beim aeroben biologischen Abbau eines Sekundärpartikels



Abb. 2-4: Haufwerksfuß bei MBA-Fraktion 0 - 40 mm nach 24 h Setzung [IVU, o.J.]

Die Mikroorganismen sind in der wässrigen Phase angesiedelt, die jedes Partikel umgibt. Als Substrat für den Stoffwechsel dienen bereits gelöste oder erst durch Hydrolyse in Lösung überführte Substanzen. Der Transport von Nährstoffen, Sauerstoff und der Stoffwechselprodukte erfolgt in der Flüssigkeit durch Diffusion. Die Zugänglichkeit der Flüssigkeit zum Feststoff erfolgt direkt an der Oberfläche eines Partikels und im Inneren über unterschiedlich lange Mikroporen der Partikel. Mit abnehmender Partikelgröße erhöht sich deshalb die Substratverfügbarkeit und es verringern sich die Transportwege. Durch den Verbrauch des Sauerstoffs und die geringe Diffusion dringt dieser trotz möglicherweise tieferreichender Mikroporen nicht weit in das Partikel ein, so dass ein anaerober Kern und eine aerobe Peripherie in der Realität wahrscheinlich sind⁴ [Reinhardt, 1999].

Im Inneren des Sekundärpartikels gebildete anaerobe Metabolite (Zwischenprodukte des Stoffwechsels, insbesondere organische Säuren) werden bei strikt aeroben Bedingungen in nachgeschalteten, häufig mikrobiologischen Prozessen ebenfalls zu CO₂ oxidiert. In heterogenen Haufwerken kann dies in den peripheren Bereichen der Partikel unvollständig erfolgen [Reinhardt, 1999]. Ursache ist die Struktur von Schüttungen aus Rottegut, die strikt aerobe Bedingungen trotz einer Durchströmung nicht zulassen.

Die gegenseitige Orientierung der Sekundärpartikel bildet die durchströmbare Struktur des Haufwerks. Zwischen den Partikeln existieren Zwischenräume, die als Makroporen aufgefasst werden können. Eine Vorstellung von den realen Bedingungen vermittelt die Abb. 2-4 anhand eines Fotos vom Haufwerksfuß einer 2,90 m hohen Schüttung aus MBA-Rottegut

⁴ Beispielsweise beträgt die Eindringtiefe des Sauerstoffs bei einem Partikeldurchmesser von 1 cm etwa 100 µm [Reinhardt, 1999].

nach einer eintägigen Liegedauer⁵. Durch den statischen Druck im Haufwerk kommt es durch Setzungsvorgänge zu einer weiteren Bildung oder zu einer Vergrößerung von Sekundärpartikeln, so dass auch der Anteil anaerober Einschlüsse im Gesamtsystem zunimmt. Gleichzeitig verringert sich die spezifische und absolute freie Oberfläche der Partikel sowie die Anzahl und Größe der für die Durchströmung notwendigen Makroporen. Dadurch werden eine Belüftung und der Gasaustausch erschwert, so dass sich die biologischen Abbauprozesse verlangsamen. Weil die Intensität dieser Vorgänge und die Einflüsse vielfältig und vom konkreten Stoffsystem abhängig sind, muss eine Bewertung der vorliegenden Bedingungen auf Untersuchungen an realen (großtechnischen) Rotteguthaufwerken beruhen.

2.2 Entwicklung der technologischen Nutzung

Das älteste Verfahren zur technologischen Nutzung aerober biologischer Prozesse in der Abfallbehandlung ist die Kompostierung. Insbesondere im landwirtschaftlichen Bereich und im privaten Garten wird sich schon lange dieser natürlichen Vorgänge bedient. Eine Notwendigkeit zur großtechnischen Erzeugung von Kompost aus anfallenden Reststoffen bestand lange Zeit nicht, weil die Deponierung häuslicher Abfälle die einfachste und zugleich kostengünstigste Lösung war. Insbesondere in der Vorkriegszeit bestand der Abfall zudem überwiegend aus Asche und enthielt nur wenige nativ-organische Stoffe. Die wenigen enthaltenen Wertstoffe wurden durch den heute als informellen Sektor bezeichneten Bereich erfasst [SASE, 2010].

Der wachsende Wohlstand führte zu einem Nahrungsmittelüberfluss und zu einem wachsenden Anteil nativ-organischer Stoffe im Abfall. Dadurch veränderte sich das Verhalten des Materials im Deponiekörper durch biologische Abbauprozesse drastisch. Kompostierungsverfahren wurden zunehmend als Lösung dieser Probleme und als Möglichkeit zur Abfallverwertung angesehen. Seit Mitte der 50er Jahre wurde Hausmüll als Substrat unter teilweiser Zumischung kommunaler Klärschlämme in solchen Verfahren behandelt. Die trockene Grobfraction sollte zu Ersatzbrennstoffen für Industrieanlagen aufbereitet werden, konnte aber aus technischen, umweltrechtlichen und wirtschaftlichen Gründen kaum eingesetzt werden [Schu, 2006]. Die Qualität der nassen Feinfraktion und damit der Komposte war aufgrund der im Hausmüll enthaltenen Stör- und Schadstoffe schlecht. In der zweiten Hälfte der 80er Jahre setzte infolge des Handlungsdrucks und gestiegener Ansprüche an die Abfallwirtschaft ein Umdenken ein. Angestoßen durch erfolgreiche Pilotversuche an der Kompostierungsanlage Witzenhausen kam es vermehrt zur Getrenntsammlung von Bioabfällen und damit zu steigenden Mengen an hochwertigen Komposten [Kehres, 2009], [Schu, 2006]. Die Verwertung von Bioabfällen sowie Vorgaben zur Hygiene und den Schadstoffgehalten der Komposte bzw. Gärreste wurden erstmals verbindlich mit der Bioabfallverordnung (BioAbfV)⁶

⁵ Das Foto wurde an einer Versuchseinrichtung zur Ermittlung des Druckverlustes realer Schüttungen (Anfangsschütthöhe 2,90 m) aufgenommen, worauf in 5.4.1 detailliert eingegangen wird.

⁶ Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden, Inkrafttreten 1. Oktober 1998 [BioAbfV, 2012]

1998 geregelt. Gegenwärtig werden die Anlagen mit anaeroben Stufen nach- bzw. ausgerüstet, um der stofflichen eine energetische Nutzung hinzuzufügen.

Aufgrund vielfältiger Faktoren lässt sich der Gehalt an nativ-organischen Komponenten im Restabfall nur reduzieren, aber nicht ausschließen. Die Auswirkungen im Deponiekörper sollten durch die Anwendung von Verfahren der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung seit den 70er Jahren verringert werden. Der Abfall wurde vor einer Ablagerung mechanisch aufbereitet, d.h. in der Regel zerkleinert, und auf geordneten Deponien eingelagert. Auslöser hierfür war die Einführung des Abfallbeseitigungsgesetzes 1972 [Heyer, 2003]. Das Abfallgesetz (AbfG) von 1986 legte dann bereits erste Anforderungen an die Entsorgung fest, wobei die Verwertung Vorrang haben sollte. Der MBA-Gedanke reduzierte sich weiterhin auf eine reine Vorbehandlung vor der Deponie [Schu, 2006]. Mit dem Ziel einer emissionsarmen und weitgehend nachsorgefreien Deponie sowie den Bestrebungen einer verstärkten Verwertung von Abfällen wurden 1993 in der TA Siedlungsabfall (TASi)⁷ Grenzwerte für abzulagernde Abfälle festgelegt. Diese konnten nur durch eine Behandlung vor der Deponierung eingehalten werden und waren vollständig allein durch chemisch-thermische Verfahren (Müllverbrennung) zu erreichen. Dieser Umstand wurde politisch und in der Fachöffentlichkeit teilweise kritisiert, weshalb Untersuchungen zur Eignung der MBA durchgeführt wurden⁸ [Kühle-Weidemeier, 2007]. Die Ergebnisse flossen u.a. in einen Bericht des Umweltbundesamtes [UBA, 1999] ein, welcher eine MBA vor der thermischen Behandlung sowie Kombinationsverfahren mit stoffstromspezifischer Behandlung (d.h. Ablagerung einer biologisch behandelten und thermische Verwertung der heizwertreichen Fraktion) als mit der TASi vereinbar ansah. Das Bundesumweltministerium stellte daraufhin fünf „Eckpunkte für die Zukunft der Entsorgung von Siedlungsabfällen“ vor, in welchen für die Vorbehandlung der Siedlungsabfälle auch mechanisch-biologische Verfahren zugelassen wurden. Folglich wurden in die AbfAbIV spezielle Grenzwerte für die Deponierung von MBA-Abfällen hinzugefügt.

Nach Novellierung der rechtlichen Rahmenbedingungen verblieben vier Jahre für Planung, Genehmigung, Ausschreibung, Bau und Inbetriebnahme der MBA-Anlagen. Dabei kamen sehr unterschiedliche und teilweise nicht großtechnisch erprobte Behandlungskonzepte zum Einsatz. Die Anlagen mussten an die speziellen Standortbedingungen angepasst werden und stellten jeweils Unikate dar [Kühle-Weidemeier, 2007]. Der biologische Teil wurde verfahrensoffen ausgeschrieben, so dass die Auslegung und die Wahl der Aggregate den Verfahrensanbietern überlassen wurde. Damit lag auch die Gewährleistung der Funktionalität und die Einhaltung der Grenzwerte bei den Anlagenherstellern [Ketelsen, 2006]. An der Umsetzung waren insbesondere wenige Ingenieurbüros und mittelständische Anlagenbauer beteiligt. Der Preisdruck und die vereinbarten Garantien für nicht ausreichend erprobte Verfahren gefährdeten oder vernichteten die Existenz einiger der Beteiligten. Probleme zeigten

⁷ Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993, Inkrafttreten 01. Juni 1993, Außerkrafttreten 16. Juli 2009. Fortschreibung als Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV)

⁸ Zu nennen sind auf Bundesebene das Verbundvorhaben „Mechanisch- biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ (1995-1999) mit 18 Teilvorhaben [Soyez, 2001] sowie Untersuchungen in einzelnen Bundesländern, insbesondere in Niedersachsen.

sich beim Anlagendurchsatz, weil ein ungenügendes Behandlungsziel⁹ längere Behandlungszeiten erforderte. Außerdem traten erhöhte Betriebskosten durch Verschleiß und Probleme bei der als RTO (Regenerativ-Thermische Oxidation) ausgeführten Abluftbehandlung auf¹⁰. An etlichen MBA-Anlagen musste daher die Betriebsweise oder die technische Ausstattung verändert werden [Kühle-Weidemeier, 2007]. Beobachtungen an bestehenden Anlagen zeigen, dass die Probleme im Wesentlichen bis heute auftreten, sich in einigen Fällen sogar verschärft haben und anderweitige Probleme im Langzeitbetrieb hinzukamen.

2.3 Einordnung in das System der Abfallwirtschaft

Unter dem Aspekt der Kreislaufwirtschaft muss in Deutschland ein jährliches Nettoabfallaufkommen¹¹ von etwa 333 Millionen Tonnen verwertet oder nicht verwertbare Reste beseitigt werden. „Bau-/Abbruchabfälle“ haben mit ca. 60 Ma.-% den mit Abstand größten Massenanteil. „Übrige Abfälle“, bei welchen es sich überwiegend um Abfälle aus Produktion und Gewerbe sowie der Wasserwirtschaft handelt, liegen mit ca. 16 Ma.-% an zweiter Position. An dritter Position liegen die „Festen Siedlungsabfälle“ mit etwa 15 Ma.-% vor den „Abfällen aus der Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen“ mit ca. 9 Ma.-% [Destatis, 2014a]. Für die Systematik der Abfallarten ist zunächst eine Unterscheidung zwischen Siedlungsabfällen und Gewerbeabfällen (aus Industrie und Handwerk) sinnvoll. Die Abb. 2-5 stellt die weitere Untergliederung dar.

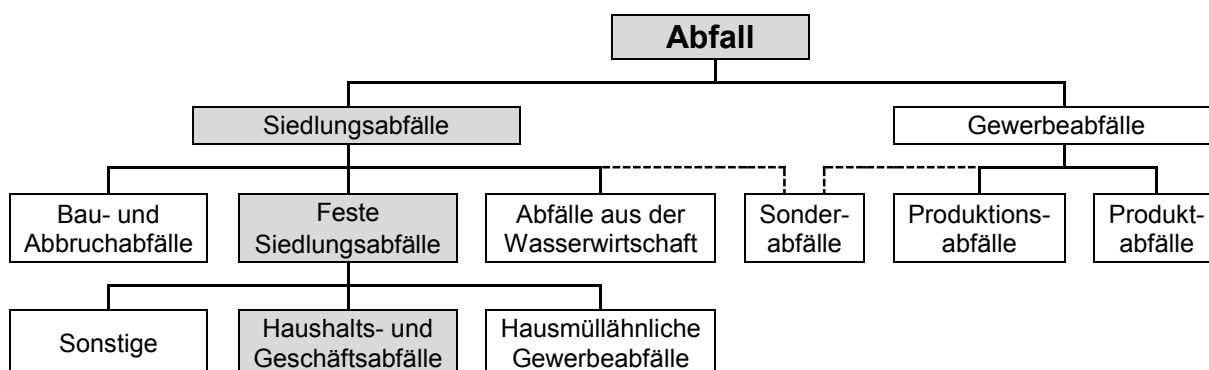


Abb. 2-5: Systematik der Abfallarten und grau hinterlegt der Geltungsbereich der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit festen Siedlungsabfällen, speziell mit den Haushalts- und Geschäftsabfällen. Wesentliche Unterarten dieser Kategorie sind beispielsweise Glas, Papier, Leichtverpackungen, Sperrmüll, Bioabfall, Grünabfall und Restabfall. Restabfälle aus privaten Haushalten, Geschäften (auch Kleingewerbe) und öffentlichen Gebäuden bzw. Flächen werden gemeinsam über die kommunale Müllabfuhr entsorgt und direkt oder von Umladestationen an die Behandlungsanlagen transportiert. Die in MBA-Anlagen ebenso behandelten hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle werden separat angeliefert.

⁹ Insbesondere beim Summenparameter für den gesamten gebundenen organischen Kohlenstoff TOC (engl.: total organic carbon) im Eluat, dem DOC (engl.: dissolved organic carbon).

¹⁰ Anfangs Unterdimensionierung und bis heute Verblockungen der Wabensteine durch Siloxane.

¹¹ Gesamtes Abfallaufkommen abzüglich Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen (Sekundärabfälle).

Nur Stoffsysteme mit biologisch abbaubaren organischen Komponenten sind für eine biologische Behandlung geeignet. Dennoch können auch Abfälle (zur Beseitigung) ohne solche Komponenten sinnvoll in den Prozess einbezogen werden, wie die Diskussion zur Verbesserung der Rottefähigkeit in 8.4.2 (S. 136 ff.) zeigen wird. Der Anteil der organischen Komponenten im Stoffsystem lässt sich anhand von Sortieranalysen oder in Form der organischen Trockensubstanz (oTS)¹² quantifizieren. Für den Prozess ist nur die biologisch abbaubare oTS relevant, also allein der Anteil nativer und nicht der künstlichen Organik.

Abhängig von der Art der Abfälle ist der Anteil nativer Organik im Stoffsystem unterschiedlich groß. Entsprechend lassen sich zwei Kategorien definieren:

- Biogene Abfälle: überwiegend nativ-organische Komponenten
- Abfälle mit biogenem Anteil: nur bestimmter Anteil nativ-organischer Komponenten

Typische Vertreter der ersten Kategorie sind Bioabfall und der zweiten Kategorie Restabfall. Abfälle mit biogenem Anteil fallen nicht unter die BioAbfV, so dass eine stoffliche Verwertung der biogenen Komponenten nicht zugelassen ist.

Zur nachhaltigen Minderung des stofflichen Gefährdungspotentials der Abfälle mit biogenem Anteil sind diese zu verwerten oder zu behandeln. Eine aktive Gefährdungsminde rung beruht auf Verfahren zur weitestgehenden Stabilisierung des Abfalls. Möglichkeiten dafür bietet eine biochemische Umwandlung bei niedrigen Temperaturen von 20 bis kurzzeitig 80 °C verbunden mit einer stofflichen Umwandlung. Das Temperaturniveau ist das Kennzeichen biologischer Verfahren. Eine chemische Umwandlung bei hohen Temperaturen von etwa 800 °C ist das Einsatzgebiet der Verfahren der Thermischen Abfallbehandlung in Müllverbrennungsanlagen mit der Möglichkeit einer energetischen Verwertung [UBA, 1999].

Zur Bewertung des verbliebenen Gefährdungspotentials von behandelten, abzulagernden Stoffen hat der Gesetzgeber Parameter festgelegt. Aus deponietechnischer Sicht sind die Atmungsaktivität innerhalb von vier Tagen (AT₄), Gasbildungsrate innerhalb von 21 Tagen (GB₂₁) und Gesamtkohlenstoff (TOC) im Eluat (DOC) relevant. Der Gehalt an organischer Substanz im Trockenrückstand (oTS) muss durch den Kennwert TOC oder den Brennwert nachgewiesen werden. Der TOC ist wie der Glühverlust unabhängig von der biologischen Abbaubarkeit, so dass sich dessen Festlegung weniger aus deponietechnischer als vielmehr abfallwirtschaftlicher Sicht bestimmt. Dadurch soll eine Ausschleusung der heizwertreichen Komponenten aus dem Deponiegut erzwungen werden [Dach, 2000].

Im Jahr 2012 wurde in Deutschland in 170 Thermischen Abfallbehandlungsanlagen eine Materialmenge von etwa 24,2 Mio. Mg behandelt. Darüber hinaus existierten 60 Anlagen für mechanisch-biologische Verfahren mit 4,3 Mio. Mg/a Input. Die Anzahl an Thermischen Behandlungsanlagen nahm seit 2005 leicht und die der mechanisch-biologischen Anlagen sehr stark zu [Destatis, 2014b]. In Europa insgesamt ist mit einem teilweise starken Ausbau der Zahl an MBA-Anlagen zu rechnen, während in Deutschland vereinzelte Anlagen von der Schließung bedroht sind.

¹² Ermittlung häufig über den Glühverlust bei der Veraschung der getrockneten Probe: Massenverlust im Ofen bei einer Temperatur von 550 ± 25 °C. Es verbleibt der anorganische (mineralische) Anteil.

2.4 Technologische Konzepte aerober Restabfallbehandlung

Als Besonderheit biologischer Verfahren gilt der Rückgriff auf ein existierendes Reaktionssystem, wodurch die Verfahrensgestaltung stark eingeschränkt wird. Übliche externe Zugriffsmöglichkeiten, wie z.B. die Anpassung der thermodynamischen Parameter Druck und Temperatur, scheiden aus oder müssen in definierbaren engen Grenzen liegen. Zugleich existiert nur eine eingeschränkte Variationsbreite bei den Eigenschaften des Stoffsystems, damit dieses aerob biologisch abbaubar – kurz: rottefähig – bleibt.

Möglichkeiten zum aeroben biologischen Abbau des Stoffsystems sind eine Behandlung als:

- Belebtschlamm (Suspendierung/Lösung des Stoffsystems und Belüftung)
- Durchströmte Schüttung
 - Bewegt (kontinuierlich oder intermittierend)
 - Ruhend (Festbett)

Zum biologischen Abbau in der Flüssigphase werden die Komponenten durch Belüftung und Durchmischung im Wasser suspendiert und in Schwebelage gehalten bzw. gelöst. Die Sauerstoffversorgung erfolgt durch fein verteilte Luftblasen im vielfachen Überschuss bezogen auf den stöchiometrischen Sauerstoffbedarf. Aus verfahrenstechnischer Sicht kommen diese als dreiphasige Wirbelschicht angesehenen Verhältnisse einem idealen Prozess nahe. So ist ein permanenter Ausgleich von Makrogradienten möglich, die Wärmeabfuhr ohne zusätzliche Maßnahmen gegeben und aufgrund der geringen Partikelgrößen die volumenspezifische Oberfläche groß, was den Stofftransport begünstigt. Die kontinuierliche Betriebsweise ermöglicht annähernd stationäre Bedingungen bei der zugleich maximalen technisch realisierbaren aeroben Abbaugeschwindigkeit. Die Effekte sind nur durch einen enormen Energieaufwand für die Belüftung des Stoffsystems zu erreichen. Für die Reinigung von Kommunalabwasser ist dies alternativlos. Für feste Abfälle ist das Verfahren ausgeschlossen. Eine Darstellung war notwendig, um die teilweise gravierenden Kompromisse beim Einsatz der übrigen Verfahren deutlich zu machen.

Die Behandlung des Stoffsystems muss in Form einer Schüttung erfolgen. Bei den technologischen Konzepten mit bewegter Schüttung wird kontinuierlich bzw. intermittierend mechanische Energie eingetragen. Solche Konzepte lassen sich allgemein mit dem Begriff „Dynamischer Rotteraktor“ beschreiben. Beispiele sind der Etagen- bzw. Turmreaktor, bei welchem das Substrat den Reaktor auf Böden im Gegenstrom zur Luft kontinuierlich durchläuft, oder der Drehrohrreaktor, bei welchem das Substrat in einer sich drehenden Trommel aerob behandelt wird. Besonders die Bedingungen im Drehrohr kommen dem Idealprozess des aeroben Abbaus in wesentlichen Aspekten nahe. Durch die Materialbewegung wird die Substratverfügbarkeit (freie Oberflächen) erhöht und der Aufbau von Gradienten während des Rotteprozesses verhindert. Die Wärmeabfuhr aus dem Material wird verbessert, weil der Wärmetransport in der Schüttung als limitierender Faktor entfällt. Durch eine dosierbare Wasserzugabe kann in die für den biologischen Abbau und die Wärmeabfuhr relevante Wasserbilanz eingegriffen werden. Das gradientenfreie Haufwerk ermöglicht eine exakte Anpassung der Belüftung an den Bedarf. Zudem sind die Eigenschaften des Outputmaterials, insbesondere die Reinheit der bei der MBA abzutrennenden Fraktionen, denen mit anderen Systemen

erzielten Eigenschaften überlegen [Bartha, 2008]. Dennoch finden diese Konzepte in Deutschland kaum Anwendung. Ursachen beim Etagen- bzw. Turmreaktor sind die höheren Investitionen durch den größeren apparativen Aufwand und die große mechanische Beanspruchung von Stoffsystem und Apparatetechnik. Ursachen beim Drehrohrreaktor sind höhere Investitionen und negative Erfahrungen beim Einsatz in der Bioabfallkompostierung. Bioabfall stellt jedoch ein nasses, strukturarmes Stoffsystem dar und ist ohne ausreichende Strukturierung für ein Drehrohr nicht geeignet.

Am meisten verbreitet ist eine aerobe Behandlung als ruhende Schüttung im Festbett. Die technologischen Konzepte sind in der Abb. 2-6 dargestellt.



Abb. 2-6: Technologische Konzepte für Rotteprozesse im Festbett und grau hinterlegt der Geltungsbereich der Arbeit, verändert nach [Brummack, 2015]

Zu unterscheiden sind folgende Systeme:

- offen
- halboffen
- geschlossen

In offenen Systemen findet die Behandlung in Form von Rottemieten statt, wobei fast ausschließlich Trapez- und Dreiecksmieten gewählt werden. Die Belüftung erfolgt aktiv mittels erzwungener Konvektion oder passiv unter Ausnutzung der (natürlichen) freien Konvektion. Bei einer aktiven Belüftung werden nichtstationäre Belüftungselemente (z.B. Drainrohre) eingebaut oder die Miete auf stationären Belüftungsböden errichtet. Dabei ist eine Druck- oder eine Saugbelüftung möglich. Bei der Druckbelüftung ist die Strömungsrichtung der eingeblasenen Luft von den Belüftungselementen oder dem Boden aufwärts zur Mietenoberfläche gerichtet. Bei der Saugbelüftung tritt die angesaugte Luft über die Mietenoberfläche ein. Eine passive Belüftung erfordert den Aufbau des Haufwerks auf einer Schicht aus grobem Material (Sohlbelüftung) oder keine besonderen Vorkehrungen. Bei offenen Systemen sind bei der Belüftung auch Mischverfahren möglich, bei denen die freie Konvektion durch apparative Elemente intensiviert wird (z.B. beim Dombelüftungsverfahren).

In Halboffenen Systemen findet die Behandlung als Mietenanordnung und damit offen, aber in einer technisch eingehausten Umgebung (geschlossene Halle) statt. Die Belüftung des Rottegutes erfolgt entweder aktiv oder passiv.

Geschlossene Systeme sind direkt eingehaust und bezeichnen die Ausführungen Box, Tunnel und Container. Solche Systeme lassen sich allgemein mit dem Begriff „Statischer Rotteraktor“ beschreiben. Es ist nur eine Aktivbelüftung mittels Belüftungsboden möglich. Hierfür existieren als bauliche Ausführung Betonspaltböden, in den Boden eingelassene Schlitze

mit Belüftungsöffnungen oder in regelmäßigen Abständen in den Boden eingelassene perforierte Metallplatten [Neubauer & Öhlinger, 2006]. Anstelle der Metallplatten sind auch Belüftungsplatten aus Beton verbreitet. Zudem können perforierte Rohre in durch Loch- oder Schlitzplatten abgedeckte Aussparungen des Bodens eingelassen sein.

Die Gründe für die Wahl geschlossener oder halboffener Systeme liegen in der intensivierten Prozessführung und der Möglichkeit, weitestgehend unabhängig von äußeren Einflüssen unter definierten Bedingungen biologische Verfahren für große Stoffströme zu nutzen und eine Ablufffassung zu integrieren. Sie sind nur für Prozessphasen mit hohen Stoffwechselaktivitäten und somit für die Intensivrotte der Kompostierung und der MBA ökonomisch sinnvoll.

Für Restabfall existieren zwei Varianten zur technologischen Anwendung rein aerober biologischer Verfahren, welche in der Abb. 2-7 dargestellt sind:

- Mechanisch-biologische Stabilisierung (MBS)
- Mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA)

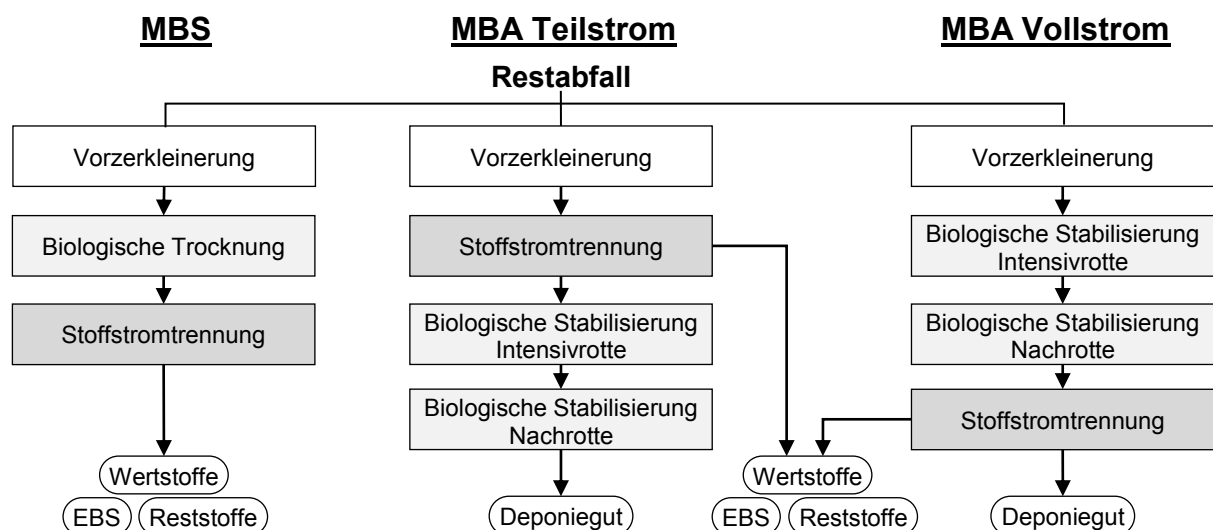


Abb. 2-7: Nutzungsvarianten rein aerober biologischer Verfahren zur Restabfallbehandlung

Bei der MBS wird der vorzerkleinerte Abfall unter aeroben Bedingungen biologisch getrocknet, indem die freigesetzte Wärme bei der Umsetzung der aerob leicht abbaubaren Komponenten zusammen mit einer intensiven Belüftung für einen Wasseraustrag genutzt wird. Anschließend werden durch eine Stoffstromtrennung enthaltene Wertstoffe sowie Reststoffe ausgeschleust. Das verbliebene trockenstabilisierte Stoffsystem enthält einen Großteil der nativen Organik sowie der heizwertreichen Fraktion und wird als Ersatzbrennstoff (EBS) einer energetischen Verwertung zugeführt. Erfolgt die Trocknung nicht biologisch, sondern technisch durch Zuführung externer Energie, wird das Konzept als mechanisch-physikalische Stabilisierung (MPS, nicht dargestellt) bezeichnet.

Bei der MBA wird der vorzerkleinerte Abfall unter aeroben Bedingungen biologisch stabilisiert und ein deponiefähiges Material aus der nicht verwertbaren Teilfraktion erzeugt (z.B. Mineralstoffe). Die native Organik wird in einem zweistufigen Prozess aus Intensiv- und Nachrotte weitestgehend abgebaut. Dem Stoffsystem werden durch eine Stoffstromtrennung entweder vor oder nach der biologischen Stufe Wert- und Reststoffe sowie Ersatzbrennstoffe entzo-

gen. Bei einer Teilstromanlage ist die Stoffstromtrennung vor der biologischen Stufe angeordnet. Diese Betriebsweise ist am meisten verbreitet, da aufgrund der Abtrennung von etwa 40 – 50 Ma.-% des Stoffsystems weniger Reaktorvolumen benötigt wird und damit die Investitionen geringer sind. Bei einer Vollstromanlage wird der gesamte vorzerkleinerte Stoffstrom aerob behandelt und erst im Anschluss die Stoffstromtrennung vorgenommen.

Bei der jeweils am Anfang jeder Konzeption stehenden Vorzerkleinerung kommen Prinzipien mit langsam drehenden Werkzeugen zum Einsatz, wie sie bei Rotorscheren oder Wellenzerkleinerern vorliegen. Die Verfahrensschritte bei der Stoffstromtrennung dienen der Klassierung und Sortierung und werden apparativ im Wesentlichen durch Siebe und Siebtrommeln, Windsichter, Magnetabscheider, Wirbelstromabscheider oder ballistische Sichter sowie sensorbasierte Verfahren realisiert.

Die Dauer der biologischen Trocknung in MBS-Anlagen beträgt etwa eine Woche. Die Rotte-dauer bei MBA-Anlagen liegt unter optimalen Bedingungen in der Intensivrotte bei drei bis sechs Wochen und in der Nachrotte bei etwa fünf bis acht Wochen. In den Prozessablauf ist bei der MBA eine Umsetzung des Materials in einen anderen Rotterektor integriert, womit eine Durchmischung des Rottegutes und ein Abbau von Gradienten (Wassergehalt, Wärme, Abbaugrad) erreicht werden soll. Bei großen Anlagen kommen hierfür spezielle voll- oder teilautomatisierte Umsetzer zum Einsatz. Bei kleinen Anlagen werden Radlader genutzt.

3 Problemanalyse zum statischen Rotterektor

3.1 Idealer statischer Rotterektor

Der statische Rotterektor stellt das vorherrschende technologische Konzept für die Realisierung der Rotte dar. Die Rotte ist bei der MBA der stoffwandelnde Schritt für die nicht verwertbaren Komponenten der Restabfälle, um definierte Zielstellungen (Ablagerungsparameter) bei den stofflichen Eigenschaften des Produktes zu erreichen. Dies stellt bestimmte Anforderungen an den Betrieb der Reaktoren und folglich an:

- Rottegut und Haufwerk, kurz: Stoffsystem
- Reaktorhülle und technische Ausrüstung, kurz: technisches System

Die Bewertung der Anforderungen unter ingenieurtechnischen Gesichtspunkten führt zu der theoretischen Konfiguration eines idealen statischen Rotterektors, wie er in der Abb. 3-1 dargestellt ist. Zu gewährleisten ist das Erreichen gleicher Prozessergebnisse an jeder Stelle im Haufwerk. Dies setzt einheitliche Rottebedingungen voraus.

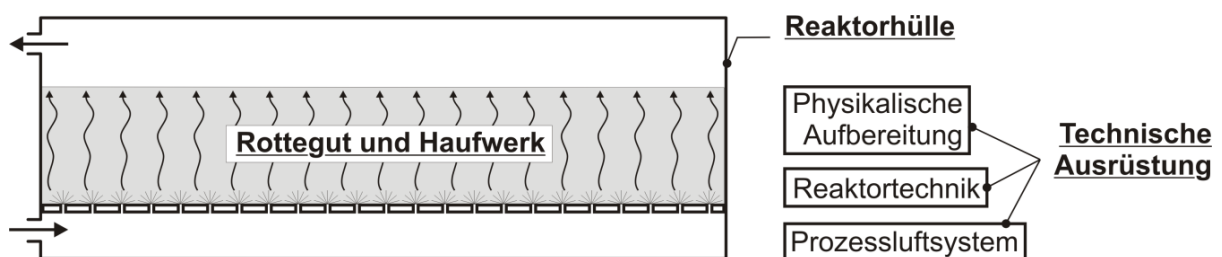


Abb. 3-1: Idealer statischer Rotterektor

Anforderungen an das Stoffsystem

Einheitliche Rottebedingungen sind nur durch eine Homogenität im Haufwerk gewährleistet, die sich folgendermaßen darstellt:

- Stoffliche Zusammensetzung
- Physikalische Eigenschaften
- Haufwerksstruktur

Die stoffliche Zusammensetzung bestimmt den Anteil nativer Organik, die Nährstoffverteilung im Stoffsystem und die biochemischen Bedingungen wie z.B. das Spektrum an Mikroorganismen und somit wesentlich die biologische Aktivität. Im Festbett eines idealen Reaktors weisen die Komponenten einen geordneten Mischungszustand auf (gleichmäßige Verteilung, ideale Homogenität). Nur diese Verteilung gewährleistet, dass die Rückwirkungen der Kom-

ponenten untereinander in jedem Volumenelement gleich sind und hieraus einheitliche Bedingungen für den Rotteprozess resultieren können.

Die physikalischen Eigenschaften werden teilweise durch die stoffliche Zusammensetzung vorgegeben und teilweise durch das Prozessverhalten oder durch technische Eingriffe beeinflusst. Beispiele sind die Wasseraufnahmefähigkeit, der pH-Wert im Wasseranteil, der Wassergehalt oder die Temperatur. Die Beeinflussung der Eigenschaften hat wiederum Auswirkungen auf den Rotteprozess, so dass eine Homogenität erforderlich ist.

Die Haufwerksstruktur wird bestimmt von den Partikelgrößen, der Partikelgrößenverteilung und der Schüttdichte bzw. Porosität. Nur an den Oberflächen der Partikel sind strikt aerobe Bedingungen möglich. Erforderlich sind deshalb eine geringe Größe der biogenen Partikel von wenigen Zentimetern und zugleich Strukturmaterial, um die Bildung von biogenen Sekundärpartikeln zu verhindern. Die Haufwerksstruktur muss eine einheitliche und eine ausreichend hohe Porosität aufweisen, um eine Durchströmung als Voraussetzung für eine stets ausreichende Versorgung der freien Oberflächen mit Luftsauerstoff und eine bilanzgerechte Abfuhr der freigesetzten Wärme sowie der Stoffwechselprodukte zu ermöglichen. Die Partikelgrößenverteilung ist eng und homogen im Haufwerk, um homogen verteilte strömungstechnische Bedingungen zu gewährleisten. Weil die Durchströmbarkeit auch durch den Strömungsweg der Luft bestimmt wird, ist die Schütthöhe im Rotteraktor einheitlich.

Zum Erreichen der Prozessziele muss die Homogenität im Stoffsystem über die gesamte Rottedauer bestehen bleiben. Die gewünschten biologischen Prozesse führen zu einer Verschiebung innerhalb der formulierten Eigenschaften des Stoffsystems, indem bestimmte organische Fraktionen (leicht abbaubare zuerst) abgebaut werden und damit deren Anteil am Stoffsystem abnimmt. Gleichzeitig ist damit eine Verringerung der Wärmefreisetzung verbunden und es gibt Veränderungen im Wasserhaushalt durch abbaubedingte Bildung und luftgetragene Abfuhr von Flüssigkeit. Weist das Stoffsystem die diskutierte Homogenität auf, erfolgen die Veränderungen an allen Stellen im Haufwerk einheitlich.

Anforderungen an das technische System

Im idealen Rotteraktor stellt die Reaktorhülle nur eine bauliche Begrenzung für das Haufwerk dar. Eine Störung der Schüttung oder des Prozesses tritt durch diese nicht auf. Die Reaktorhülle ist als adiabatisch und dicht zu betrachten, weil andernfalls die Homogenität der Bedingungen in allen Haufwerksbereichen nicht gewährleistet wäre. Stoff- und Wärmeströme liegen nur in Form einer definierten Zu- und Abluft vor.

Die Aufbereitung des Rottegutes vor der Rotte muss definiert und reproduzierbar erfolgen, um die formulierten Eigenschaften des Stoffsystems für alle Abfallchargen zu gewährleisten. Die technischen Einrichtungen müssen differenziert auf verschiedene Komponenten reagieren und mögliche Ungleichheiten des Ausgangsmaterials abbauen können. Die Beschickung der Rotteraktoren darf keine negativen Auswirkungen auf die Ausbildung der Haufwerksstruktur und deren Homogenität haben.

Eine Prozessüberwachung ist aufgrund der Eigenschaften des Haufwerks mit wenig Aufwand realisierbar. Folglich sind eine Bilanzierung des Prozesses und eine an die Erforder-

nisse angepasste Prozessregelung möglich. Die Belüftungsintensität muss an die Bedingungen im Haufwerk entsprechend der Wärmebilanz angepasst werden können. Sie stellt sich als Druckdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Haufwerks in Korrelation zur Durchströmbarkeit einer Schüttung dar und kann durch Anpassung der Ventilatorleistung reguliert werden (siehe Abb. 3-2).

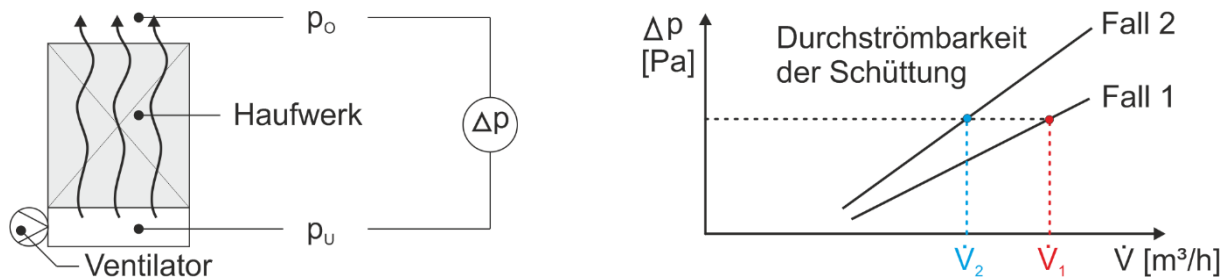


Abb. 3-2: Druckverlust über einem durchströmten Haufwerk (links: Prinzip, rechts: Betriebspunkt bei zwei Schüttungen mit unterschiedlicher Durchströmbarkeit)

3.2 Realer statischer Rotterektor

Die Anforderungen an einen idealen statischen Rotterektor sind bei einem realen Reaktor nicht oder nur teilweise zu erfüllen. In der Abb. 3-3 sind wesentliche Abweichungen in den Eigenschaften eines idealen und realen Rotteguthaufwerks (Festbett) gegenübergestellt.



Abb. 3-3: Eigenschaften eines idealen und eines realen Festbetts statischer Rotterektoren

Eine homogene Rottegutzusammensetzung und einheitliche Partikelgrößen im Haufwerk sind nicht möglich. Abfall besteht aus einer Vielzahl verschiedener Komponenten mit entsprechenden Eigenschaften und Wechselwirkungen untereinander. Enthalten sind sowohl mechanisch stabile als auch elastische/plastische Komponenten. Zugleich unterscheiden sie sich in der Saugfähigkeit. Die Abb. 3-4 ordnet diesen Komponenten typische Beispiele zu. Dieser Umstand hat relevante Auswirkungen auf das Materialverhalten in den Schritten vor der Rotte, bei der Reaktorbeschickung und während der Rotte.

	Feste Phase saugfähig	Feste Phase nicht saugfähig	
mechanisch stabil	Ziegel, Holz	Metalle, kompakte Kunststoffe	Kontinuierliche Phase Oberflächenwasser, andere flüssige und pastöse Komponenten
elastisch und plastisch	biogene Stoffe, Schaummaterial	Gummi, Hohlkörper	

Abb. 3-4: Zusammensetzung einer Restabfallfraktion mit Beispielkomponenten

Das Materialverhalten gegen Scherung und Prall ist werkstoffabhängig. Die Erzeugung eines homogenen Stoffsystems in den Aufbereitungsschritten vor der Rotte ist deshalb ausgeschlossen. Verteilungen der Partikelgrößen und Abweichungen von der für die Substratverfügbarkeit optimalen Kugelform sind zwingend.

Die Unregelmäßigkeiten der Korngrößen und Materialdichten führen bei der Errichtung eines Haufwerkes zu Entmischungseffekten. Kleine Partikel füllen Hohlräume, während große Teile obenauf liegen bleiben. Leichte Teile werden in der Luft (Flugbahn infolge der Reaktorbeschickung) stärker abgebremst als schwere Teile und treffen näher an der Abwurfstelle auf. Zudem können entsprechend geformte Partikel das Haufwerk entlang rollen, während die übrigen Partikel liegen bleiben. Im Haufwerk verteilte Komponenten vergleichbarer Größe und Dichte können ein abweichendes Prozessverhalten zeigen, wenn es sich um Komponenten unterschiedlicher Art handelt, z.B. Bälle und Äpfel.

Die Materialbewegung in den Schritten vor der Rotte und die Reaktorbeschickung führen zum Agglomerieren von Primärpartikeln und damit zur Bildung von biogenen Sekundärpartikeln. Während der Rotte hat die Einwirkung des Schwerkräftfeldes auf die Partikel eine zeitabhängige Setzung und damit die Bildung weiterer Sekundärpartikel und eine Änderung der Porosität zur Folge. Abhängig von der Fähigkeit zur Wasserkapazität der Komponenten kann dies zur Presswasserfreisetzung führen.

Die Apparatewände können in der Realität die strömungstechnischen Bedingungen im Haufwerk beeinflussen. In der Verfahrenstechnik sind die damit verbundenen Effekte unter dem Begriff der Randgängigkeit bekannt. Die flächige Begrenzung durch die Reaktorwände führt zu geordneten Strukturen mit größerer und damit abweichender Porosität im Wandbereich gegenüber anderen Bereichen und somit zur Ausbildung systematischer Vorzugsströmungen. Die Effekte sind aufgrund des Spektrums an Partikelgrößen, der beschriebenen Separierung bei der Reaktorbeschickung sowie der geringeren Setzungsneigung der an den Wänden abgelagerten Komponenten und aufgrund der Wandeffekte wahrscheinlich.

Mit der Belüftung und dem Rotteprozess ist eine unvermeidbare Änderung in den Eigenschaften des Haufwerks verbunden. Wärme kann hauptsächlich durch Ausnutzung der Verdunstungskühlung abgeführt werden. Eine Triebkraft für den Stofftransport besteht, wenn der Partialdruck von Wasser an der Oberfläche des Partikels größer als in der Luft ist, d.h. ausreichend Flüssigkeit am Partikel vorliegt und die Luft Wasser aufnehmen kann. Allerdings trocknen die Partikel mit der Zeit oberflächlich aus. Weil sich die Luft auf ihrem Strömungsweg im Haufwerk erwärmt, wird sich die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasser im Strömungsweg ändern. Auch örtliche Unterschiede in der Belüftungsintensität (Vorzugsströmungen) führen zu einem ungleichen Austrag an Wasser und Wärme. Der Wassergehalt und die Temperatur im Haufwerk werden sich örtlich und zeitlich ungleichmäßig ändern und den biologischen Prozess beeinflussen. Zu Unterschieden muss auch die biologisch bedingte Wasserfreisetzung beitragen.

Die Heterogenität im Haufwerk macht eine den örtlichen Anforderungen angepasste Prozessregelung und eine brauchbare Bilanzierung unmöglich. Die Berücksichtigung abbaubedingter Unterschiede bei der Wärmefreisetzung ist nicht möglich und die Belüftungsintensität

zur Wärmeabfuhr örtlich von der vorliegenden Haufwerksstruktur abhängig. Die Annahme adiabater Wände ist nicht zutreffend, weil in Wirklichkeit Wärmeverluste auftreten, die insbesondere an der Reaktordecke im Inneren zu einer Kondensation von Wasserdampf führen. Das Kondensat tropft auf das Haufwerk und verursacht in den oberflächennahen Bereichen eine Erhöhung des Wassergehaltes.

3.3 Schlussfolgerung

Die Problemanalyse hat zahlreiche unvermeidbare Abweichungen zwischen idealem und realem statischen Rotteraktor gezeigt. Die für das Betriebsverhalten der Rotteraktoren relevanten Aspekte lassen sich thematisch zu vier Blöcken zusammenfassen:

- Durchströmung: Wird beeinflusst durch die Durchströmbarkeit des Haufwerks und diese durch die Charakterisierung von Rottegut bzgl. stofflicher Zusammensetzung und Korngrößenverteilung sowie durch die Haufwerksstruktur
- Wärmehaushalt: Wird beeinflusst durch die Wärmefreisetzung beim biologischen Prozess, die Wärmeabfuhr durch Belüftung und beschrieben anhand des Temperaturfeldes im Haufwerk
- Wasserhaushalt: Wird beeinflusst durch die Wasserkapazität und den Wassertransport, die Wasserfreisetzung beim biologischen Prozess, den Wasseraustrag durch Belüftung und beschrieben anhand des Wassergehaltes
- Prozessführung: Umfasst die Rottedauer, die Prozessüberwachung und Prozessregelung sowie die Belüftungsintensität

Die Themenblöcke sind im Folgenden durch eine Darstellung zum Stand des Wissens auf in der Literatur bekannte Fragestellungen und Lösungen zum realen statischen Rotteraktor bzw. zum Festbett zu untersuchen. Neben Antworten auf potentielle Fragen im Fortgang der Arbeit sollen zugleich die Problemanalyse untersetzt und die gewählte Herangehensweise der Arbeit argumentativ unterstützt werden.

4 Stand des Wissens zum statischen Rotterektor

4.1 Durchströmung

4.1.1 Durchströmbarkeit

Nach [Scholwin, 2005] stellt „die Durchströmung [...] einen sehr großen, möglicherweise sogar den größten, Unsicherheitsfaktor bei der biologischen Behandlung von Abfällen [...] dar [...]“. Begründet wird dies mit der fehlenden Beschreibung der Strömungsverteilung im Haufwerk. Die Strömungsverteilung resultiert aus der Gleichheit bzw. aus Unterschieden in der Durchströmbarkeit innerhalb des Haufwerks.

Von technischer Seite besteht eine Beeinflussung der Durchströmbarkeit durch die Reaktorhülle. Weil Veröffentlichungen zeigen, dass Randgängigkeit nur für Behälter- zu Partikeldurchmesser-Verhältnisse kleiner 10/1 bedeutend ist [Eisfeld & Schnitzlein, 2001], gingen die meisten Autoren im Abfallhaufwerk von einer gleichmäßigen Strömung über dem Querschnitt aus [Scholwin, 2005]. [Scholwin, 2005] schätzt den Wandeinfluss für die Kompostierung als gering ein, weil das Verhältnis der Durchmesser sehr groß ist. Zudem vermutet der Autor, dass der Anteil des effektiv durchströmten Porenraums am gesamten Porenvolumen bei Abfall niedriger als bei losen Kugelschüttungen ist, welches mit 41 % bestimmt wurde.

Bei den Einschätzungen ist zu berücksichtigen, dass das Verhältnis fast ausschließlich auf Untersuchungen von Modellschüttungen mit kugel- oder zylinderförmigen Teilen gleicher Größe und Form beruht, wie sie in Packungen verfahrenstechnischer Apparate vorkommen. Es sind keine Publikationen bekannt, welche die unvermeidlichen Separationseffekte bei der Errichtung von Rotteguthaufwerken als Einflussfaktor berücksichtigen. Aufgrund der Korngrößenverteilung von Restabfallfraktionen ist eine ausgeprägte Inhomogenität bei der Durchströmung wahrscheinlich. Die Größenordnung des effektiv durchströmten Porenraums dürfte deshalb niedriger liegen als oben genannt.

[Kraft, 2001] bewertete Methoden zur Sichtbarmachung von Flussbahnen von Fluiden im Haufwerk und fand für biogene Abfälle nur die Nutzung von Tracern geeignet. In einer Versuchseinrichtung (DN 200, H = 0,1 m) wurden als Methode gefärbter Rauch, ein Partikelstrom und eine chemische Reaktion (H_2S mit Zinkchlorid) untersucht. Keine dieser Methoden lieferten verwertbare Ergebnisse.

Die Beschreibung der Durchströmbarkeit poröser Medien erfolgt durch den Strömungsdruckverlust, welcher anhand der Modellvorstellungen des hydraulischen Durchmessers (Kapillarmodell) oder der Einzelpartikelumströmung erfolgen kann [VDI, 2013]. Aufgrund der Komplexität realer Schüttgüter sind häufig empirische Ansätze notwendig. Bei den Ansätzen sind neben charakteristischen Größen des Fluides auch Parameter der Schüttung wie Permeabilität und Passabilität berücksichtigt, welche von den Eigenschaften des porösen Mediums abhängen [Neumann, 2007]. Deren Bestimmung führt bei heterogenen Stoffsystemen wie Restabfall zu Problemen, weil die effektive Länge des Durchströmungspfades unbekannt ist und nicht fundiert berechnet werden kann.

Zur Charakterisierung der Durchströmbarkeit mithilfe des Druckverlustes Δp kommt überwiegend die Carman-Kozeny-Gleichung zur Anwendung. Sie gilt für laminare Strömungsbedingungen und stellt nur den laminaren Term der Gleichung von Ergun (4-1) dar.

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\eta}{d_p^2} v + 1,75 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho}{d_p} v^2 \quad (4-1)$$

Die Gleichung von Ergun besteht aus einem ersten Term für die laminar dominierte und aus einem zweiten Term für turbulent dominierte Strömung. Enthalten sind die Strömungsgeschwindigkeit v , die Porosität ϵ , der Sauterdurchmesser d_p sowie die Viskosität η und Dichte ρ des Fluides. Das Übergangsgebiet zwischen beiden Strömungsformen wird durch die Gleichung nicht abgebildet. Die Berechnung des Sauterdurchmessers erfolgt anhand der Partikelgrößenverteilung oder mit der volumenspezifischen Oberfläche, wobei letzteres insbesondere bei porösen Partikeln zu Fehlern führt [VDI, 2013]. Zudem liegt in heterogenen Schüttungen keine einheitliche Porosität vor und es müsste zwischen luftgefülltem und wassergefülltem Porenvolumen unterschieden werden. Die Dispersität von Abfall zeigt sich in uneinheitlichen Partikeldurchmessern und äußert sich als ungleichmäßige Verteilung der Partikelgrößen im Festbett.

Eine verallgemeinerte Form der Carman-Kozeny-Gleichung stellt die Darcy-Gleichung (4-2) dar, bei welcher die Eigenschaften des Festbetts in der experimentell zu ermittelnden Durchlässigkeit K (auch als Permeabilität bezeichnet) zusammengefasst werden [VDI, 2013].

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = \frac{\eta_L}{K} v_{y=0} \quad (4-2)$$

Sie ist nur für kleine Strömungsgeschwindigkeiten gültig, berücksichtigt die Geschwindigkeit $v_{y=0}$ am Eintritt in das Haufwerk als Leerrohrgeschwindigkeit und die Viskosität der Luft η_L [Lynch & Cherry, 1996]. Die Durchströmbarkeit ist umso besser, je größer K ist. Die Autoren haben Laboruntersuchungen (Apparatedurchmesser 0,305 m, Schütthöhe 0,30 m) zur Ermittlung der Durchlässigkeit durchgeführt. Für Holzhackschnitzel lag K bei $5,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^2$ sowie für eine Mischung aus Mist, Stroh und Hackschnitzeln bei $0,81 - 2,4 \cdot 10^5 \text{ cm}^2$. Die große Differenz der Werte zeigt, dass derartige Untersuchungen von den konkreten Randbedingungen (Stoffsystem, Apparat) abhängen und die Messergebnisse nur Aussagen zu möglichen Größenordnungen zulassen.

Anstelle der Durchlässigkeit lässt auch der Druckverlust eine Beschreibung der Durchströmbarkeit zu. Untersuchungen von [Saint-Joly et al., 1989] mit verschiedenen Arten von Stallmist (Apparatur: $d = 0,6$ m, $H = 0,9$ m) brachten einen Zusammenhang

$$\Delta p = A \cdot v^n \quad (4-3)$$

zur Geschwindigkeit hervor, wobei die Konstanten A und n abhängig vom Stoffsystem sind. Der Druckverlust erhöht sich streng monoton mit einem Polynom n -ten Grades und überproportional, weil $n > 1$ ist. Die Höhe des eingesetzten Apparates ist kritisch zu sehen, weil sie nicht annähernd die Größenverhältnisse realer Rotteguthaufwerke abbildet.

[Mu & Leonard, 1999] untersuchten einen Restabfall/Klärschlamm-Kompost mit Haufwerkshöhen von 0,68 m, 1,45 m und 2,20 m in einer Einrichtung mit rechteckigem Querschnitt ($A_Q = 0,36$ m²). Die Messergebnisse konnten mathematisch wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta p = (101637 H + 173473) \dot{V}^{0,0126 H + 1,1998} \quad (4-4)$$

Der Druckverlust erhöhte sich auch hier überproportional mit dem Volumenstrom.

Korrelationen unter Berücksichtigung der Schüttungshöhe sind besser geeignet, weil sie universell auf verschiedene Haufwerke übertragbar sind. In der Gleichung (4-4) zeigt der Druckverlust über der Haufwerkshöhe nur eine geringe Abweichung von der Linearität. Ähnliche Zusammenhänge sind verbreitet zu finden, wobei die dem Volumenstrom vorangestellten Koeffizienten sowie die Exponenten der Gleichung stoffabhängig sind. Zu nennen sind beispielsweise [McGuckin & Eiteman, 1999] für mit synthetischem Strukturmaterial konditioniertem Bioabfall. Für Biofilter, die ebenfalls ein Haufwerk mit biogenen Komponenten darstellen, wurde der Druckverlust von [MacFarlane, 1999] im Laborversuch bestimmt, indem Drucktransmitter mit definiertem Abstand übereinander in der Schüttung platziert wurden. Es ergab sich eine Linearität der Messwerte und damit des Druckgradienten über der Schüttungshöhe. Eine vom genannten Autor erstellte Übersicht veröffentlichter Untersuchungsergebnisse zu kompostbasierten Biofiltern zeigte eine Bandbreite der Werte zwischen 52 und 3000 Pa/m. Die fehlende Charakterisierung der Schüttung macht solche Angaben unbrauchbar, weil diese nur die Heterogenität derartiger Haufwerke verdeutlichen.

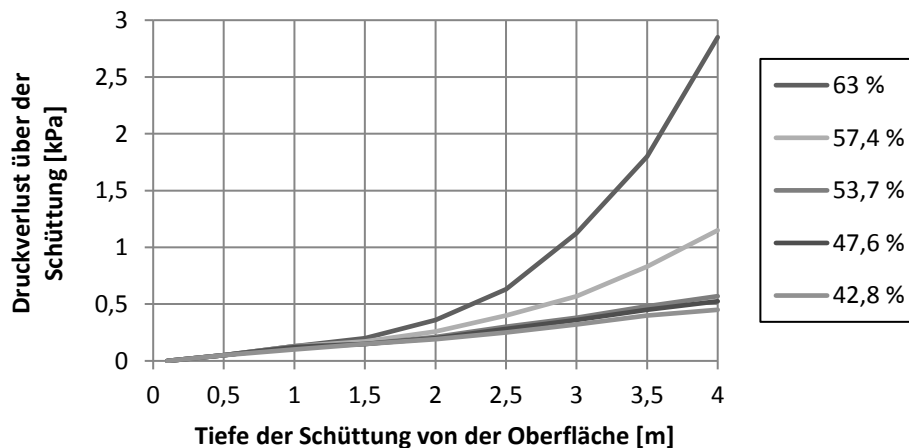


Abb. 4-1: Berechneter Druckverlust von konditioniertem Klärschlamm in Abhängigkeit verschiedener Tiefenpositionen in der Schüttung und Wassergehalte [Das & Keener, 1997]

Entgegen den Beobachtungen der Linearität machten Untersuchungen an einer Laboranlage ($d = 0,30 \text{ m}$, $H = 0,40 \text{ m}$) mit Kuhmist sowie konditioniertem Klärschlamm (Rinde, Sägemehl, zurückgeführter Kompost) eine nichtlineare Erhöhung des Druckverlustes über der Haufwerkshöhe deutlich, wie die Abb. 4-1 für Klärschlamm zeigt [Das & Keener, 1997]. Begründet wurde der Verlauf mit der nichtlinearen Durchlässigkeit, welche sich exponentiell mit steigendem Porenvolumen erhöhte. Weil Angaben in der Veröffentlichung eine Bestimmung des Porenvolumens auf Basis eines eigens verdichteten Stoffsystems in einem Pyknometer vermuten lassen, ist die Genauigkeit dieser Größe kritisch zu sehen. Durch den technischen Eingriff ist eine Beeinflussung der Haufwerksstruktur und der Messwerte wahrscheinlich.

Der Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und dessen Verlauf über der Schüttungshöhe ist demnach uneinheitlich. Eine mögliche Ursache sind die Eigenschaften der untersuchten Stoffsysteme. Veröffentlichungen zeigen hierzu abweichende Ergebnisse. In den Untersuchungen von [Das & Keener, 1997] hat der Wassergehalt bei Klärschlamm einen signifikanten und bei Kuhmist einen weniger starken Einfluss auf die Luftdurchlässigkeit. Begründet wird dies mit der erhöhten Wasserkapazität von Kuhmist, welche den faserigen und nichtkohäsiven Charakter auch bei hohen Wassergehalten bewahrt. Für Klärschlamm ist in der Abb. 4-1 eine signifikante Erhöhung des Druckverlustes nur bei Wassergehalten größer 57 % ersichtlich. Untersuchungen zum Biofilter in [MacFarlane, 1999] zeigen für höhere Wassergehalte ebenfalls höhere Druckverluste, wobei der Zusammenhang nichtlinear ist. In Versuchen mit Strukturmaterialien der Kompostierung von [Barrington et al., 2002] veränderte sich der Druckverlust uneinheitlich mit steigendem Wassergehalt. Teilweise nahm er erst zu und dann ab, manchmal umgekehrt oder auch stetig fallend. Bei den Untersuchungen von [Saint-Joly et al., 1989] mit verschiedenen Arten von Stallmist erhöhte sich der Druckverlust jeweils mit dem Wassergehalt. Eine Zunahme des Druckverlustes mit steigendem Wassergehalt wurde in Untersuchungen von [Ginkel, 1996] zur Kompostierung eines Gemisches Stroh/Hühnermist beobachtet. Dieser Zusammenhang bestand nur bei frischem, aber nicht bei schon gerottetem Material. Obwohl ein erhöhter Wassergehalt von einer Verringerung des Porenvolumens begleitet wird, kann damit nach [Richard et al., 2004] gleichzeitig eine gesteigerte Durchlässigkeit zusammenfallen, was offensichtlich durch die Agglomeration der Feinanteile hervorgerufen wird. In den Untersuchungen zu Bioabfall von [Kraft, 2001] erhöhte sich der Druckverlust mit steigendem Wassergehalt, was mit der Ausprägung von Flussbahnen erklärt wurde. Erst ab Werten von 57 % wäre anstelle der Feststoffmasse direkt der Wassergehalt für die Größenordnung des Druckverlustes verantwortlich.

Die Durchströmbarkeit wird im Prozess durch die Setzung und die Alterung des Materials beeinflusst. Zur Änderung des Druckverlustes über der Rottedauer liegen nur wenige Informationen vor, obwohl sie aus prozesstechnischer Sicht relevant sind. Durch natürliche Setzung von 10 % und biologische Abbauvorgänge stellte sich bei [Mu & Leonard, 1999] für einen Restabfall/Klärschlamm-Kompost über der Versuchsdauer von zwei Wochen eine Zunahme des Druckverlustes um etwa das Dreifache ein. Nach [Barrington et al., 2002] nahm der Druckverlust bei der Kompostierung von Heu, Stroh oder Sägespänen mit Gülle jeweils überwiegend mit dem Alter des Festmaterials zu, was auf eine abnehmende Haufwerksstruktur zurückgeführt wurde. Teilweise gab es inkonsistente Ergebnisse, auch aufgrund abwei-

chender Anfangswassergehalte. In den Untersuchungen von [Ginkel, 1996] wurden bei gerottetem Material (Stroh/Hühnermist) geringere Druckverluste als bei frischem Rottegut beobachtet. Als Ursache wurden zunehmende klebrige und schmierige Eigenschaften des Materials angenommen, welche im Umsetzvorgang der Miete zur Bildung von Agglomeraten führen und im Ganzen die Porosität in der Schüttung erhöht. Andererseits führte eine Gegenüberstellung der Durchlässigkeit für unterschiedlich lange gerottetes Material nicht zu einem statistisch verwertbaren Ergebnis.

Zusammenfassung

Die Durchströmung des Festbetts kann bei idealen Schüttungen mithilfe des Druckverlustes modelliert werden. Die hierzu notwendigen Parameter lassen sich für Rottegut aus Restabfallfraktionen nicht bestimmen. Die meisten Autoren gingen von einer homogenen Durchströmung aus. Wahrscheinlich ist jedoch ein heterogenes Stoffsystem mit entsprechenden Auswirkungen auf die Durchströmung. Experimentelle Untersuchungen als Basis von Korrelationen wurden überwiegend in kleineren Apparaten sowie nur für die Kompostierung und nicht für MBA-Abfälle durchgeführt. Die wirklichen Zustände im großtechnischen Rotteraktor sind nicht bekannt. Die Ergebnisse zeigen teilweise eine lineare oder teilweise eine nicht-lineare Zunahme des Druckverlustes über der Haufwerkshöhe. Aus den Angaben wird häufig nicht ersichtlich, ob Setzungserscheinungen und damit die Zeitabhängigkeit berücksichtigt wurden. Zum Einfluss des Wassergehaltes existieren uneinheitliche Aussagen, so dass dieser stark abhängig vom Stoffsystem sein muss. Überwiegend nahm der Druckverlust mit steigendem Wassergehalt zu, teilweise wird hierbei jedoch eine Agglomeration bewirkt, die zu einer Verminderung führen kann.

Weil die Charakterisierung des Rottegutes und die Haufwerksstruktur relevante Einflussfaktoren für die Durchströmung sind, sind beide Aspekte im Folgenden näher zu betrachten.

4.1.2 Charakterisierung von Rottegut

Stoffliche Zusammensetzung

Die Zusammensetzung des Restabfalls bestimmt sich aus Art, Menge und Anteil spezieller Fraktionen im Gesamtgemisch. Bei den anfallenden Mengen aus Haushalten gibt es große Unterschiede zwischen ländlichen Regionen mit 109 kg pro Einwohner und Jahr [kg/(Ew·a)] und einer offenen Mehrfamilienhausbebauung mit durchschnittlich 201 kg/(Ew·a). Dabei ist die Schwankungsbreite in den Gebietsstrukturen mit 80 bis 400 kg/(Ew·a) sehr groß. Eine genaue Quantifizierung der Geschäftsabfallmenge liegt nicht vor. Untersuchungen ergaben, dass deren Anteil am gesamten Restabfallaufkommen in ländlichen Regionen bei 15 bis 20 % und in Städten bei 25 bis 30 % liegt [Fricke et al., 2002]. Aufgrund der ersichtlichen Unterschiede sind Mittelwertbildungen zur Bewertung des Anlageninputs stets unbrauchbar.

Maßgeblich für eine biologische Behandlung ist der Anteil biologisch abbaubarer Komponenten im Stoffsystem. Für Restabfall weisen Veröffentlichungen beträchtliche Größenordnungen mit starken Unterschieden auf. Eine Sortieranalyse im AZV Südniedersachsen erbrachte

einen Anteil der Organik von etwa 30 % an der Gesamtmenge. Das Sammelsystem Biotonne war im Gebiet flächendeckend vorhanden, zum Anschlussgrad liegt keine Information vor [Kern & Siepenkothen, 2012]. Untersuchungen in Bayern zeigten, dass der Anteil der Organik (Grobfraktion und Menge in der Mittelfraktion) im Restabfall bei 38 % lag. Dabei waren im betrachteten Gebiet (städtisch und ländlich) fast dreiviertel der Einwohner an einem Biotonnensystem angeschlossen [LfU Bayern, 2008]. Bundesweit durchgeführte Hausmüllsortieranaysen verdeutlichten im Mittel einen Anteil von etwa 40 % organischer Fraktion. Bei Haushalten mit Biotonnennutzung lag der Wert bei 36 % und bei welchen ohne separate Erfassung bei 56 % [Kern & Siepenkothen, 2014]. Analysen zeigten, dass sich die Variationsbreite des Organikanteils mit Einführung der Biotonne verringerte, aber immer noch bei bis zu 60 %-Punkten lag [Fricke et al., 2002]. Weil sich durch die Biotonnennutzung die Gesamtrestabfallmenge verringert, resultierte in anderen Untersuchungen bei Haushalten mit Biotonne ein höherer Anteil an Organik im Restabfall als bei fehlender Getrenntsammlung [Schneider & Lebersorger, 2009].

Der Mittelwert des Organikanteils lag in ländlichen Regionen nach Einführung der Biotonne vier Prozentpunkte über dem von städtischen Strukturen [Fricke et al., 2002]. Dagegen wurden als Widerspruch nur geringfügige Unterschiede zwischen Stadt und Land bei den für eine biologische Behandlung relevanten Kenngrößen TS, oTS und biologisch abbaubarer oTS im Rotteinput angegeben [Fricke & Müller, 1999]. Andere Untersuchungen zeigten, dass der Anteil an Küchen- und Speiseabfällen im Restabfall bei Mehrfamilienhäusern (Stadt) um 3 bis 5 Ma.-%-Punkte höher als bei Einfamilienhäusern (Land) ist. Dies ist unabhängig davon, ob eine Biotonne vorhanden ist oder nicht [Schneider & Lebersorger, 2009]. Die Ergebnisse zeigen die Unzulässigkeit einer Mittelwertbildung zur Charakterisierung häuslicher Abfälle allgemein und speziell für eine Behandlungsanlage.

Die Organik stellt im Restabfall die größte Fraktion dar. Die Abb. 4-2 zeigt links Untersuchungsergebnisse aus dem AZV Südniedersachsen, wonach als weitere große Fraktionen Papier/Pappe/Kartonagen mit 11 %, Reste der nicht-organischen Feinfraktion (< 40 mm) mit 8 %, Kunststoffe mit 6 %, Glas mit 5 %, Verbunde mit 4 % sowie Metalle mit 2 % auftreten. Den Rest stellen sonstige Abfälle wie Schadstoffe, Elektrokleingeräte oder Textilien dar.

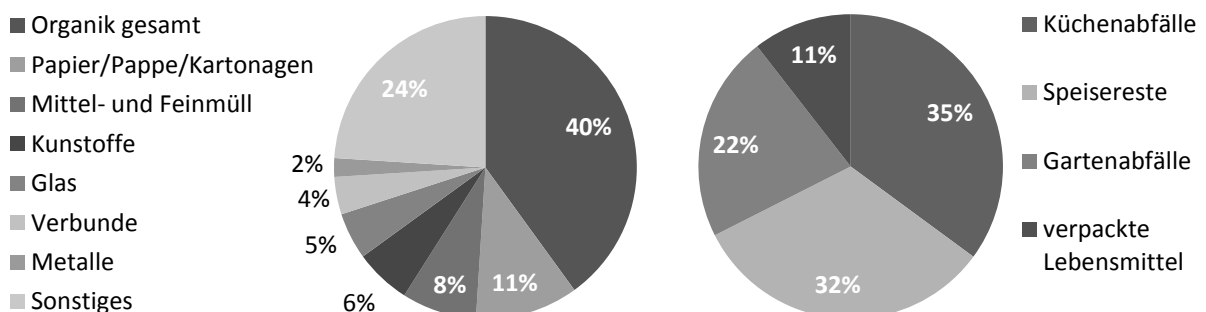


Abb. 4-2: Zusammensetzung von Restabfall (links) [Kern & Siepenkothen, 2012] und der enthaltenen Organikfraktion (rechts) [Kern & Siepenkothen, 2014]

Auch bei den genannten Fraktionen kann von einer Varianz in Abhängigkeit des Sammelgebietes ausgegangen werden. So ist die Zusammensetzung beim Geschäftsmüll abhängig von der Branche sehr verschieden (z.B. Gastronomie, Banken), weshalb eine Einzelfallbe-

trachtung zwingend erforderlich ist [Fricke et al., 2002]. Eine mögliche Ursache liegt darin, dass Stadtzentren durch den vermehrten Anfall an Abfall der dort konzentrierten Gewerbetreibenden gekennzeichnet sind.

Der Anteil der Organik im Stoffsystem von MBA-Anlagen liegt über den genannten Werten, weil durch die physikalische Aufbereitung vor der Rotte ein Großteil der übrigen Komponenten vor der biologischen Behandlung entfernt wird. Nach [Fricke & Müller, 1999] beträgt der Organikanteil in vorzerkleinertem Abfall des Siebdurchgangs 40 mm, welcher das Inputmaterial der Rotte darstellt, etwa 54 %.

Nur leicht abbaubare Komponenten nehmen in der MBA am Prozess aktiv teil, während beispielsweise holzige Komponenten bestenfalls Strukturbildner darstellen. Eine entsprechende Differenzierung erfolgt in der Literatur häufig nicht. Es ist eine Analyse der Organikfraktion bzgl. der Zusammensetzung notwendig. Problematisch stellt sich hierbei jedoch die zielgerichtete Zuordnung der Komponenten dar. Die Abb. 4-2 zeigt rechts als Ergebnis bundesweiter Analysen 35 % Küchenabfälle, 32 % Speisereste, 22 % Gartenabfälle und 11 % verpackte Lebensmittel [Kern & Siepenkothen, 2014]. Nach [Fricke et al., 2002] werden Gartenabfälle überwiegend durch die Biotonne abgeschöpft oder der Eigenkompostierung zugeführt, so dass der Einfluss der Jahreszeiten auf die Menge an Organik im Restabfall seit Einführung der Biotonne nicht mehr von Bedeutung ist. Variationen in der Zusammensetzung der übrigen organischen Komponentengruppen im Jahresverlauf erscheinen hingegen wahrscheinlich.

Korngrößenverteilung

Bei der Kompostierung wurden mit Partikelgrößen zwischen ca. 3 und 50 mm allgemein gute Ergebnisse bei der Behandlung erzielt [Rynk, 1992]. Bei der MBA sind aufgrund der Stoffstromtrennung zusätzlich Aussagen zum Partikelgrößenspektrum der im Ausgangsmaterial enthaltenen Fraktionen erforderlich. Die Beurteilung erfolgt üblicherweise durch Korngrößenverteilungen. In der Abb. 4-3 ist die Summenverteilung für Restabfall für eine Siebweite von 0 bis 150 mm dargestellt.

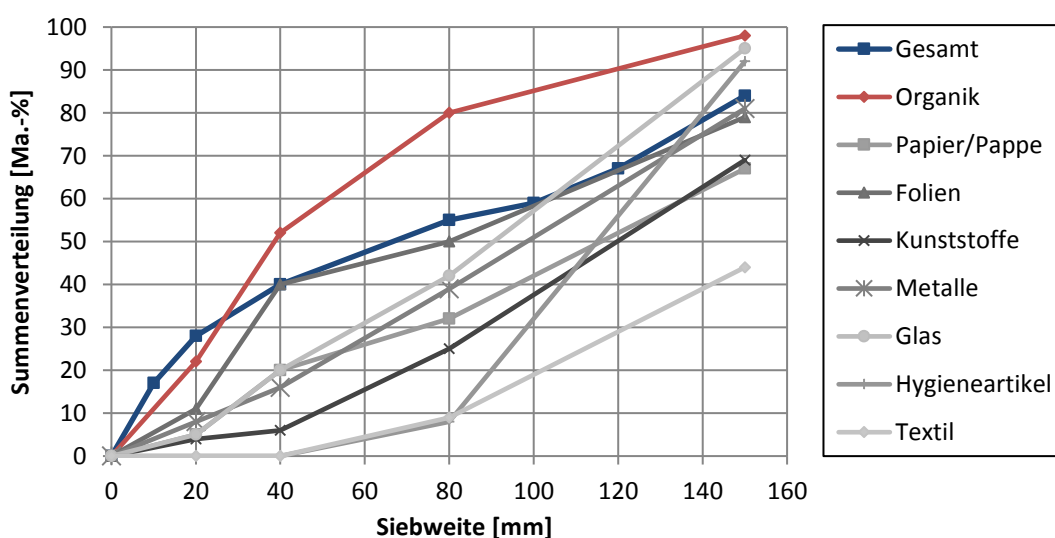


Abb. 4-3: Korngrößenverteilung (in Ma.-%) von Restabfall aus Haushalten und Geschäften und einzelner darin enthaltener Fraktionen [Fricke et al., 2002]

Die blaue Linie charakterisiert die Verteilung für den gesamten Restabfall. Etwa 40 % der Komponenten sind im Klassenbereich 0 bis 40 mm enthalten. Weitere 40 % liegen zwischen 40 und 150 mm und die restlichen 20 % sind größer. Die organischen Komponenten sollen getrennt behandelt werden, so dass Informationen über deren Größenspektrum erforderlich sind. Die rote Linie zeigt große Anteile in den unteren Korngrößenklassen. Demnach besitzen 80 % eine Größe zwischen 0 und 80 mm. Durch den Einsatz von Trennaggregaten (Siebe) mit dieser Maschenweite kann ein Großteil der Organik erfasst werden. In MBA-Anlagen wurde der Siebschnitt infolge der Korngrößen auf < 40, < 60 und in Einzelfällen < 80 mm festgelegt [Ketelsen, 2006]. Obwohl in der Literatur keine Unterscheidung zwischen der leicht und schwer abbaubaren Organik erfolgt, kann davon ausgegangen werden, dass die letztgenannten Komponenten überwiegend große Korngrößen besitzen und demnach der Anteil der in der MBA nutzbaren leicht abbaubaren Fraktionen größer als dargestellt ist.

Die erfassbaren Mengen an Organik können durch ein Dekompaktieren mittels Zerkleinerung der angelieferten Abfälle gesteigert werden. In der Restabfallbehandlung kommen als Zerkleinerungsaggregat Walzen-, Schnecken- und Kugelmühlen (Langsamläufer) sowie Hammermühlen (Schnellläufer) zum Einsatz [Müller et al., 2000]. Die Abb. 4-4 stellt die Wirkung einer Zerkleinerung mit verschiedenen Aggregaten anhand der Korngrößenverteilung für den Restabfall (links) und für die darin enthaltene Organikfraktion (rechts) dar.

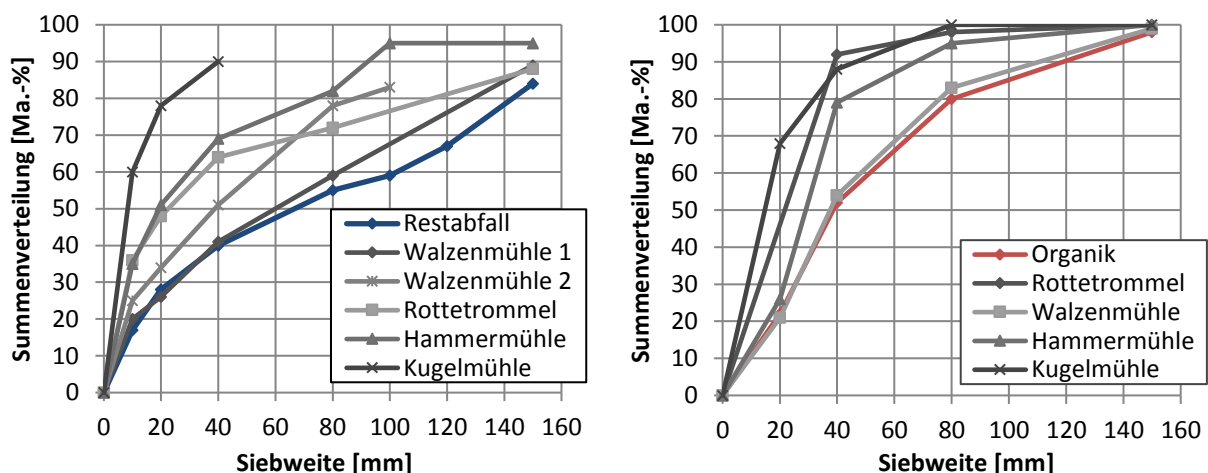


Abb. 4-4: Korngrößenverteilung (in Ma.-%) von Restabfall (links) und der darin enthaltenen Fraktion Organik (rechts) jeweils vor und nach der Zerkleinerung mit verschiedenen Aggregaten [Fricke & Müller, 1999]

Die Kurven verschieben sich jeweils nach links in Richtung kleinerer Korngrößen. Bei der Organik erhöht sich hierdurch der Anteil der Fraktion kleiner 80 mm von 80 % auf 95 bis zu 100 %. Die Unterschiede bei der Zerkleinerung resultieren aus dem Einsatz unterschiedlicher Aggregate. Beim Restabfall sind aber auch starke Differenzen zwischen den beiden Walzenmühlen (vermutlich sind damit Kamm-Walzen-Zerkleinerer gemeint) ersichtlich. Die Zerkleinerung hängt somit nicht nur vom Typ, sondern auch von der konkreten Konfigurationen des Aggregates und vom Verschleiß ab. Die Ergebnisse können zudem das Resultat veränderter Randbedingungen sein (z.B. Zusammensetzung des Stoffsystems).

Die Eigenschaften des Rottegutes können variieren, weil schwankende Abfallmengen oder Stoßbeschickungen der Aufbereitung zu unterschiedlichen Qualitäten in den einzelnen Pro-

zessstufen führen, was sich negativ auf die Ergebnisse nachfolgender Aggregate auswirkt [DWA, 2013]. So ist die Durchsatzleistung der Vorzerkleinerer in der Regel höher als die der nachgeschalteten Aggregate [Ketelsen, 2008]. Bei der anschließenden Siebung wird infolge der sogenannten Siebüberlastung oft ein erheblicher Anteil der Feinfraktion mit dem Siebüberlauf (d.h. der Grobfraktion) ausgetragen und einer biologischen Behandlung entzogen [Soyez et al., 2001]. Auch während der Siebvorgänge bleibt die Trenngüte selten konstant, weil es zu Anbackungen kommen kann, wodurch sich der freie Querschnitt der Sieblöcher und folglich die maximale Partikelgröße verringert [Ketelsen, 2008]. Ursache ist im Wesentlichen der hohe Wassergehalt des Stoffsystems.

Die Korngrößenverteilung bleibt während der Rotte nicht konstant. Es kommt zu Strukturveränderungen infolge der Zerkleinerungswirkung durch Umsetzvorgänge und die Nachbehandlung sowie infolge von prozessbedingter Mineralisierung [Fricke & Turk, 2000]. In Untersuchungen mit MBA-Material (Rottecontainer und aktiv belüftete Nachrotte) nahm der Anteil der Fraktion < 20 mm mit der Behandlungsdauer zu. Innerhalb dieser Fraktion stieg der Anteil < 10 mm deutlich an, was durch eine besonders hohe Abbaubarkeit der Fraktion 10 bis 20 mm begründet wurde. Bei den mittleren Fraktionen gab es keinen einheitlichen Trend. Ein möglicher Erklärungsansatz ist eine Agglomeratbildung oder eine Verstopfung von Sieblöchern [Doedens et al., 2000]. Auch weitere Untersuchungen (Rottetunnel und aktiv belüftete Nachrotte) zeigten vergleichbare Ergebnisse [Kühle-Weidemeier, 2004]. Daneben ist auch die Aufnahme von Abrieb größerer Fraktionen denkbar, wobei sich der Effekt aufgrund der geringen Menge nicht bei einzelnen Grobfraktionen, sondern in Summe nur bei den Kleinfractionen zeigt und damit deren Anteil erhöht.

Zusammenfassung

Informationen zur Zusammensetzung und Korngrößenverteilung lassen sich dazu nutzen, eine Klassierung auszulegen und das Verhältnis bestimmter Stoffgruppen durch Konditionierung zu verändern, um eine Strukturierung der Organikfraktion zu erreichen. Dies ermöglicht Einwirkungen auf die Rottebedingungen und die Durchströmbarkeit. Restabfall enthält als heterogenes Stoffsystem eine Vielzahl an Komponenten. Die Menge und Zusammensetzung wird durch die Siedlungsstruktur des Sammelgebietes und durch das örtliche Abfallwirtschaftssystem maßgeblich beeinflusst. Diese Umstände wirken sich entsprechend auf die Zusammensetzung des Rottegutes aus. Eine Charakterisierung ist deshalb nur anhand einer Schwankungsbreite bei den Eigenschaften möglich, so dass die Literaturrecherche nur die Schlussfolgerung einer ausgeprägten Heterogenität von Rottegut zulässt. Es liegen mit 30 bis 40 % signifikante Anteile an biogenen Fraktionen vor, welche zum Großteil durch eine Siebweite von 80 mm abgetrennt werden können und dann Teil des Rottegutes sind. Die Korngrößenverteilung verändert sich während der Rotte, indem der Anteil der kleinen Fraktionen durch Abbauprozesse und Abrieb ansteigt. Darüber hinaus erfolgt eine Beeinflussung durch die Art und Konfiguration der bei der Aufbereitung eingesetzten Aggregate zur Zerkleinerung und Stoffstromtrennung. Diskutiert wurde nicht, wie sich unterschiedliche Zeiträume beim Transport zur Anlage und der Lagerung in Umladestationen oder der Anlage auf die Eigenschaften auswirken. Die Bildung von Sekundärpartikeln bei der Reaktorbeschickung wurde nur ungenügend thematisiert.

4.1.3 Haufwerksstruktur

Die Zusammensetzung, die Zerkleinerung, die Entfernung von Fraktionen aus dem Stoffsystem sowie Setzungserscheinungen und biochemische Prozesse haben Auswirkungen auf die Haufwerksstruktur im Rotteraktor. Die Zustände beeinflussen die Durchströmung und machen eine integrale Beschreibung erforderlich. Hierzu sind zwei Größen geeignet:

- Schüttdichte in $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- Porenvolumen in $[\text{Vol.}\%]$, wobei für den aeroben Prozess nur das luftgefüllte Porenvolumen relevant ist und sich die Ausführungen hierauf beziehen

Die Schüttdichte lässt sich in großtechnischen Anlagen anhand des Masseeintrags in ein definiertes Volumen leicht bestimmen. Beim Porenvolumen ist dies schwieriger. Problematisch ist in beiden Fällen die Bewertung von Unterschieden innerhalb der Schüttung, weil zur Darstellung für Restabfall keine Möglichkeiten existieren. Methoden aus der Bodenkunde sind nicht anwendbar, da sie zu einer Veränderung der vorliegenden Beschaffenheit führen. Außerdem sind die Größen- und Formvielfalt der im Stoffsystem enthaltenen Teile bei Restabfall sehr viel größer als bei den Feinfraktionen im Boden. Dies macht den Einsatz von Systemen mit Stechzylindern nicht sinnvoll möglich. Für Schüttungen verfahrenstechnischer Apparate existieren Methoden zur Ermittlung der Porositätsverteilung (Harzmethode) und des resultierenden Strömungsfeldes (Prandtl-Sonde). Auch Adsorptions- bzw. Kondensationsverfahren, Pyknometrie, Kalorimetrie, Mikroskopie und optische Verfahren werden eingesetzt [Grabbert & Khokhlov, 2000], lassen aber häufig nur integrale Aussagen aber nicht immer lokale Unterscheidungen zu. Weil aufgrund des Größenspektrums der Abfallkomponenten große Stoffmengen einzusetzen sind, scheiden viele Verfahren aus. Verbreitet und nur im Labormaßstab anwendbar sind Pyknometer, deren Messprinzip auf dem Boyle'schen Gesetz idealer Gase beruht, um aus dem Druck auf das Volumen schließen zu können.

Um das Porenvolumen als Parameter nutzen zu können, müssen die Poren im Haufwerk gleichmäßig verteilt sein und ein enges Größenspektrum aufweisen. Diese Ansprüche sind nicht zu erfüllen. Bei den Betrachtungen müssen zudem Makroporen zwischen den Partikeln und Mikroporen im Feststoff unterschieden werden, auch wenn in der Realität keine Quantifizierung möglich ist. Makroporen bestimmen die Durchströmbarkeit sowie Haufwerksstruktur und sind deshalb Basis der folgenden Ausführungen.

Die Makroporen müssen die Sauerstoffversorgung, den CO_2 -Austrag und die Wärmeabfuhr gewährleisten. Bei der Kompostierung sollte das freie Porenvolumen ein Minimum von 20 bis 30 % nicht unterschreiten [Krogmann, 1994]. In der Literatur finden sich für das minimale Porenvolumen bei der Kompostierung Angaben für den Startzeitpunkt von 30 %. Werte über 60 bis 70 % scheinen dagegen überhöht zu sein, um thermophile Temperaturen zu erreichen [Ruggieri et al., 2009]. Nach [Schuchardt, 1987] sollte das Porenvolumen sogar nicht unter 50 % sinken. Untersuchungen zu Klärschlamm, der mit verschiedenen Strukturmaterialien konditioniert wurde, zeigten eine geringere biologische Aktivität in verdichteten Haufwerken. Dies wurde auf das kleinere Porenvolumen und die geringeren Sauerstoffkonzentrationen in den Luftporen zurückgeführt [McCartney & Chen, 2001].

Zielvorgaben zur Porosität sind nur dann zu erfüllen, wenn entsprechende Messmethoden zur Überprüfung bestehen. Eine Auseinandersetzung mit dieser bereits als kaum lösbar diskutierten Frage erfolgt in den Veröffentlichungen häufig nicht. In der Literatur finden sich dagegen empirische Zusammenhänge zwischen dem Porenvolumen ε_L und verschiedenen messbaren physikalischen Größen. Eine Zusammenstellung und ein Vergleich der Korrelationen durch [Ruggieri et al., 2009] zeigte, dass das Porenvolumen am besten mit der Feuchtschüttdichte in Übereinstimmung zu bringen ist. Die Gleichung

$$\varepsilon_L = 100 - \rho_{Sch,f} \cdot \left(\frac{x_f}{\rho_w} + \frac{100 - x_f}{\rho_p} \right) \quad (4-5)$$

verdeutlicht, dass sich das Luftporenvolumen mit steigender Feuchtschüttdichte $\rho_{Sch,f}$ [kg/m³] (Feuchtmasse je Volumen) verringert. Sie enthält den Wassergehalt x_f , bezogen auf die Feuchtmasse, sowie die Dichte von Wasser und der Partikel des Stoffsystems. Weil die Partikeldichte aufgrund der Heterogenität des Abfall nicht bestimmt werden kann, ist die Gleichung für Rottegut nicht brauchbar [Agnew et al., 2003].

Untersuchungen am Pyknometer in [Agnew et al., 2003] zeigten einen linearen Zusammenhang zwischen Porenvolumen und Feuchtschüttdichte im untersuchten Größenbereich des Wassergehaltes ($x_f = 25$ bis 60 %). Trotz großer Unterschiede im Wassergehalt und der Dichte verschiedener kompostierbarer Stoffe (Stallmist, Haushaltsabfälle, Gemische von Klärschlamm mit Laub, Stroh, Holzhackschnitzeln) ließ sich jeweils folgende Regressionsgerade ableiten:

$$\varepsilon_L = 100 - 0,0889\rho_{Sch,f} \quad (4-6)$$

Ein hoher Wassergehalt vergrößert die Masse und damit die Dichte, so dass sich das Porenvolumen verringert. In Untersuchungen nahm das Porenvolumen von Kompostgemischen überwiegend linear mit steigendem trockenbasierten Wassergehalt (x_{tr}) und nichtlinear mit dem feuchtebasierten Wassergehalt (x_f) ab. Manche Autoren gaben in beiden Fällen einen linearen Zusammenhang an [Ruggieri et al., 2009]. Diskutiert wird nirgends, dass vor den Makroporen im Haufwerk zunächst die Mikroporen der Partikel mit Wasser gefüllt werden. Weil dies keinen linearen Zusammenhang darstellt, muss es qualitative Sprünge geben.

In den Untersuchungen [Richard et al., 2002] mit Kompost (Kuhmist, Reste einer Papierfabrik) deckten sich die Ergebnisse zur Porosität mit folgender Gleichung, die vom Inhalt im Grunde der Gleichung (4-5) entspricht:

$$\varepsilon_L = \varepsilon - \frac{\rho_{Sch,tr}}{\rho_w} x_{tr} \quad (4-7)$$

Die Gesamtporosität ε enthält neben dem Luftporen- auch das wassergefüllte Volumen. Korrelationen mit solchen Größen sind nutzlos, weil die Volumen jeweils nicht korrekt bestimmt werden können. In diesem Fall schlug der Autor eine Berechnung von ε mit der Partikeldichte und der Trockenschüttdichte vor. Dies ist für viele Stoffsysteme ausgeschlossen.

Schüttdichten für Rottegut der mechanisch-biologischen Behandlung schwanken zu Rottebeginn zwischen 0,4 und 0,7 Mg/m³. Damit liegen sie höher als die Größenordnung 0,1 bis

0,3 Mg/m³ für unbehandelten Restabfall [Fricke & Turk, 2000]. Die großen Unterschiede kennzeichnen die diskutierte Heterogenität des Stoffsystems. Durch Ab- und Umbauprozesse sowie Setzungserscheinungen kommt es im Verlauf der Rotte zu einer Erhöhung der Dichte. Abhängig vom Rottesystem und Rotteverlauf liegen die Werte am Rotteende zwischen 0,6 und 0,9 Mg/m³, wie die Abb. 4-5 zeigt [Fricke & Müller, 1999]. Aufgrund der großen Ungleichheit verschiedener Stoffsysteme und der Schwankungen über der Rottedauer lassen sich hieraus keine verwertbaren Schlussfolgerungen ziehen.

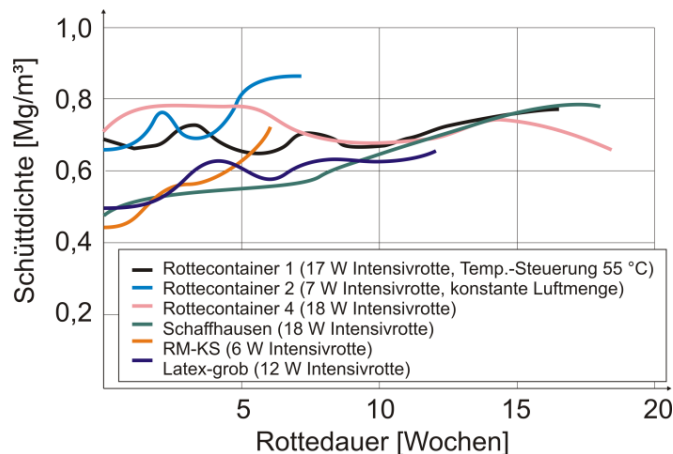


Abb. 4-5: Schüttdichte unterschiedlicher Rotteversuche und deren Veränderung über der Rottedauer [Fricke & Müller, 1999]

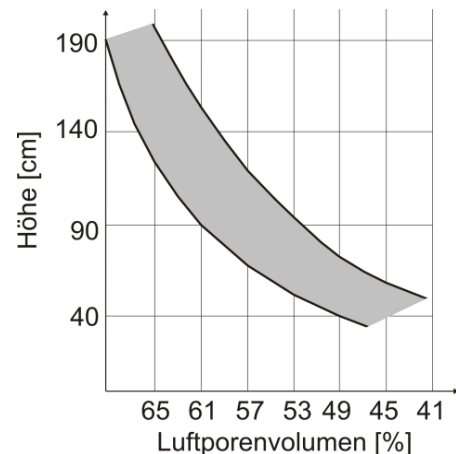


Abb. 4-6: Luftporenvolumen im Material aus Proben aus verschiedener Haufwerkshöhe [Flinsbach, 1981]

In der Literatur wird der zeitliche Einfluss häufig nicht diskutiert, so dass die Anwendbarkeit von Schüttdichten in den aufgeführten Korrelationen unklar bleibt. Ebenso ist häufig nicht angegeben, wie die Dichte zu bestimmen ist, wobei insbesondere die Abmaße der Messtechnik als entscheidend einzustufen sind. Es fehlen Aussagen darüber, ob und wie sich Dichteunterschiede über der Haufwerkshöhe in den Korrelationen widerspiegeln. Die statische Belastung in einer Schüttung führt zu einer Kompression in tiefer liegenden Schichten, wodurch sich die Schüttdichte erhöht.

[Schaub-Szabo & Leonard, 1999] setzten Container zur Bestimmung der Schüttdichte für Kompost, Holzspäne, Stroh und Torf ein. Nur Versuche in größeren Apparaten sind für Stoffe mit bedeutender Partikelgröße verlässlich genug. Die Container wurden in Lagen gefüllt und statisch belastet, um die Gesamtschütthöhe zu simulieren. Aus den Ergebnissen wurde folgende Korrelation zwischen Schüttdichte und Tiefenposition z im Haufwerk aufgestellt:

$$\rho_{Sch,f}(z) = A z^B \quad (4-8)$$

A und B sind materialabhängige Konstanten. Die Korrelation zeigt eine Nichtlinearität der Feuchtschüttdichte und einen Zusammenhang größerer Dichten in größerer Tiefe.

In [Ginkel et al., 1999] erfolgten Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Schüttdichte und der Porosität in einer Kompostmiete (Stroh/Hühnermist). Die Miete wurde in Lagen aufgebaut und dazwischen Gitter platziert, deren Setzung gemessen wurde. Die Ergebnisse deckten sich mit folgender Korrelation für die höhenabhängige Dichte:

$$\rho_{Sch,f}(z) = \rho_{Sch,unbelastet} \exp \left[\frac{F_G(H - z)}{E \cdot TS} \right] \quad (4-9)$$

Diese enthält die unbelastete Dichte $\rho_{Sch,unbelastet}$, die Gravitationskraft, die Schütthöhe H , das Elastizitätsmodul E und den Trockenmassegehalt TS . Die Dichte erhöht sich nichtlinear vom unbelasteten Wert an der Oberfläche zu größeren Werten in der Tiefe. Die Gleichung ist nur in der Anfangsphase des Prozesses gültig, weil der TS als unabhängig von der Höhe im Haufwerk angenommen wurde und dies bei längerer Liegedauer nicht gewährleistet ist.

Die Inkonstanz der Dichte über der Haufwerkshöhe muss sich auch beim Porenvolumen widerspiegeln. Für die Mietenkompostierung stellt die Abb. 4-6 eine nichtlineare Abhängigkeit nach [Flinsbach, 1981] dar. Demnach existiert in jeder Höhe ein Spektrum an möglichen Zuständen für die Größenordnung der Porosität mit einer Spanne zwischen 5 und 8 %-Punkten. Bei einer Schütthöhe von 1,90 m nimmt das Porenvolumen von 69 bis 64 % nahe der Oberfläche auf 53 bis 42 % in 65 cm Höhe nichtlinear ab, was einer Verringerung um bis zu 39 % entspricht. Informationen zur Bestimmungsmethode liegen nicht vor.

Die Zeitabhängigkeit der Setzung und die Effekte auf die Durchströmung werden wenig oder nur qualitativ in der Literatur diskutiert. Untersuchungen liegen besonders im Zusammenhang mit einer Deponierung vor. Diese Ergebnisse lassen sich nicht auf Rotteguthaufwerke übertragen. Für geschlossene Reaktoren sind keine Veröffentlichungen bekannt. Beispielsweise ist in der Abb. 4-5 für MBA-Material die für die Behandlung in der Intensivrotte relevante Zeitspanne von 1 bis 2 Wochen nicht detailliert abgebildet. Inhalt anderer Untersuchungen sind organische Stoffe wie Klärschlamm oder Mist bzw. Mischungen hieraus und meist als Laborversuch, aber keine Restabfälle oder häuslichen Bioabfälle.

Die Setzung kann allgemein in zwei Phasen eingeteilt werden. Die erste Phase wird durch physikalische Druckbeanspruchung hervorgerufen und bildet die Schüttdichteverteilung im Haufwerk aus. Eine zweite Phase wird durch den Masseverlust infolge organischer Abbauvorgänge und Feuchtigkeitsverlust verursacht. Die Setzungsgeschwindigkeit ist mit der Rotte-dauer über eine Exponentialfunktion gekoppelt [Yue et al., 2008]. Reaktorversuche mit verschiedenen organischen Substraten zeigten, dass die Setzung in jeder Höhenposition im Haufwerk stets proportional zur ursprünglichen Höhe nach der Reaktorbeschickung erfolgt. Die Intensität der Setzung nimmt zeitlich exponentiell ab. Innerhalb der ersten Tage tritt eine schnelle Setzungsphase auf, die in eine Verlangsamung übergeht und in einer Stagnation endet [Illa et al., 2012].

Zusammenfassung

Eine Beschreibung der Haufwerksstruktur ist anhand der Schüttdichte und der Porosität möglich. Über der Schütthöhe liegt eine Heterogenität vor, welche infolge einer Materialsetzung und biologischer Abbauvorgänge während des Rotteprozesses nicht konstant ist. Weil eine Berücksichtigung des Höheneinflusses in Literaturangaben überwiegend fehlt, sind viele Angaben nicht brauchbar. Für Schüttdichten sind häufig die Bestimmungsmethode und der Messzeitpunkt nicht angegeben. Die Größenangaben zu MBA-Material schwanken stark und sind damit nicht aussagekräftig. Für die Kompostierung existieren eine Vielzahl an empirisch

abgeleiteten Modellgleichungen und Angaben zur Porosität im Haufwerk. Demnach nehmen das freie Porenvolumen zum Boden hin nichtlinear ab und die Schüttdichte entsprechend zu. Mit steigendem Wassergehalt verringert sich allgemein das freie Volumen und erhöht sich die Dichte. Die Intensität der Setzung nimmt zeitlich exponentiell ab und weist einen direkten Zusammenhang zur Schütthöhe auf. Viele Untersuchungen wurden an Laboranlagen mit kleinen Stoffmengen durchgeführt, was besonders bei heterogenen Stoffsystemen kritisch zu sehen ist. Inhalt waren meist offene Kompostierungen landwirtschaftlicher Güter und damit eine Mischung weniger Komponenten einer zugleich weniger breiten Partikelgrößenverteilung wie bei Restabfall. Für Rotterektoren sind keine Angaben bekannt.

4.2 Wärmehaushalt

Bei Rotteprozessen muss bilanziell überschüssige Wärme aus dem Haufwerk abgeführt werden, um limitierende Bedingungen infolge einer erhöhten Temperatur zu vermeiden. In der Abb. 4-7 sind die Enthalpie- und Wärmeströme an einem Rotterektor dargestellt.

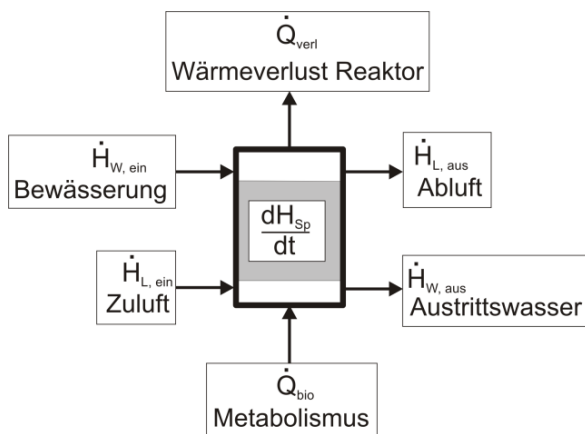


Abb. 4-7: Enthalpie- und Wärmeströme an einem Rotterektor

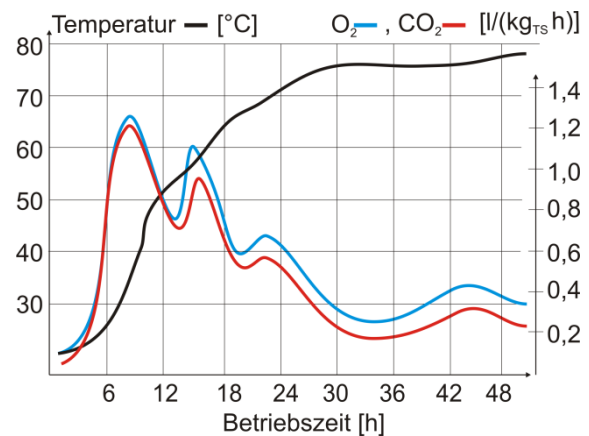


Abb. 4-8: Selbsterhitzung von Frischmüll bei konstanter Belüftungsstärke von 5,95 L_{Luft}/kg_{TS}·h [Fertig, 1981]

Die biochemischen Abbauprozesse führen zur Wärmefreisetzung \dot{Q}_{bio} und zur Selbsterwärmung des Haufwerks, die sich als Speicherwärme H_{Sp} darstellt. Die durch Belüftung in das Haufwerk eintretende Luft erwärmt sich auf die Temperatur des Haufwerks und nimmt Verdunstungswärme von Wasser auf. Die Wärmeabfuhr wird als Differenz zwischen den Enthalpieströmen der Luft zwischen Aus- und Eintritt sichtbar ($\dot{H}_{L,aus}$ und $\dot{H}_{L,ein}$). Auch durch die Bewässerung liegt ein Enthalpiestrom am Eintritt und Austritt (z.B. Presswasser) vor ($\dot{H}_{W,ein}$ und $\dot{H}_{W,aus}$). Zudem treten Wärmeverluste am Haufwerk \dot{Q}_{verl} auf. Die Bilanz lautet:

$$\frac{dH_{Sp}}{dt} = \dot{Q}_{bio} + \dot{H}_{L,ein} + \dot{H}_{W,ein} - \dot{H}_{L,aus} - \dot{H}_{W,aus} - \dot{Q}_{verl} \quad (4-10)$$

Untersuchungen zum Wärme- und Stofftransport in porösen Stoffsystemen mit biogenen Komponenten liegen v.a. zu Böden und selten zu Abfall vor [Zambra et al., 2011]. Viele Untersuchungen wurden im Labormaßstab durchgeführt, was besondere Anforderungen an die

Materialaufbereitung und gegen Wärmeverluste stellt. Modellierungen erscheinen wenig zielführend, weil die Heterogenität des Abfalls und des Haufwerks die Bestimmung realistischer Parameter nicht erlaubt.

Aerobe biologische Prozesse stellen exotherme Reaktionen dar (vgl. Gleichung (2-1), S. 7). Einige Literaturdaten zur Wärmefreisetzung je abgebauter organischer Trockensubstanz sind in der Tab. 4-1 zusammengefasst. Es liegen teilweise große Unterschiede vor, so dass die Angaben nur einen Überblick zum Spektrum an Größenordnungen zulassen. Es handelt sich um Einzelbetrachtungen ohne konkrete Informationen zu den Eigenschaften und der Zusammensetzung der Substrate.

Tab. 4-1: Literaturdaten zur Wärmefreisetzung (gerundet) bei Rotteprozessen

Substrat	Wärmefreisetzung	Quelle
Organik allgemein (aus Reaktionsenthalpie abgeleitet)	12 bis 30 MJ/kg _{oTS}	[Scholwin, 2005]
Bioabfall (vollständige Oxidation der Organik)	20 bis 22 MJ/kg _{oTS}	[Krogmann, 1994]
Hausmüll (vollständige Oxidation der Organik)	21 bis 24 MJ/kg _{oTS}	[Krogmann, 1994]
Hausmüll (unter Berücksichtigung der Abbaugrade der enthaltenen Komponenten)	20 MJ/kg _{oTS}	[Paar, 2000]
Bioabfall (großtechnisch im Kompostwerk)	14 MJ/kg _{oTS}	[ÖWAV, 2009]
Müllkompost	33 bis 42 MJ/kg _{oTS}	[Kranert, 1989]

Die freigesetzte Wärme bewirkt einen Temperaturanstieg im Haufwerk. [Fertig, 1981] führte Untersuchungen zur Selbsterhitzung von Frischmüll bei einer konstanten Belüftungsrate durch. Die Abb. 4-8 zeigt den Temperaturverlauf als schwarze Linie. Innerhalb der ersten 30 h kommt es nach einem zunächst geringen zu einem starken Anstieg der Temperatur und zum Erreichen eines Grenzwertes mit maximalen Werten von 75 °C. Eine leichte Verzögerung beim Anstieg tritt nach etwa 12 h um 50 °C ein, was bei einem ähnlichen Verlauf in [Niese, 1959] mit dem Rückgang der Anzahl mesophiler und der Zunahme thermophiler Bakterien erklärt wurde. Der Verlauf der CO₂-Konzentration (rote Linie) zeigt, dass der Stoffwechsel nach sehr kurzer Zeit (24 h) signifikant zurückgegangen ist. Es ist eine Prozesslimitierung zu vermuten, die durch eine zu geringe Wärmeabfuhr infolge einer zu geringen Belüftungsintensität hervorgerufen wurde. Damit wären die Informationen unbrauchbar.

In großtechnischen Rotteguthaufwerken wird durch die Belüftung eine bestimmte Temperatur angestrebt. In Wirklichkeit stellt sich ein charakteristisches, aber instationäres Temperaturfeld im Festbett ein. Die in der Abb. 4-9 dargestellte Situation wird laut [Kämpfer, 2001] von einigen Autoren beschrieben, jedoch wenig dokumentiert. [Scholwin, 2005] zählt hingegen einige Untersuchungen auf, allerdings überwiegend im Labormaßstab. Kennzeichen aller statischen Rottekonzepte ist ein inhomogenes Temperaturfeld im Querschnitt des Festbetts. Unterschiede im Längsschnitt wurden meist auf den an einem Haufwerksende sitzenden Ventilator zurückgeführt. Nur vereinzelt wurden Unterschiede in den Abfalleigenschaften und nirgends hieraus resultierende großräumige Störungen als Ursache diskutiert.

Bei offenen Systemen ist ein großer Wärmeverlust an den Rändern ausgeprägt, so dass im Kern des Haufwerks die höchsten Temperaturen auftreten. Die Abb. 4-9 zeigt dies unten im Haufwerksquerschnitt einer unbelüfteten offenen Dreiecksmiete. Mit einer Einhausung kön-

nen die Wärmeverluste signifikant verringert werden, wie es die Abb. 4-9 oben anhand einer Rottebox verdeutlicht, die sich in einer geschlossenen Halle befindet.

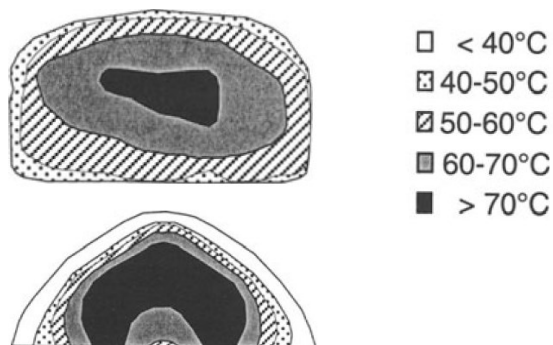


Abb. 4-9: Temperaturfeld einer Rottebox in Intervallen belüftet und in einer geschlossenen Halle platziert (oben) sowie unbelüftete offene Dreiecksmiete (unten) [Kämpfer, 2001]

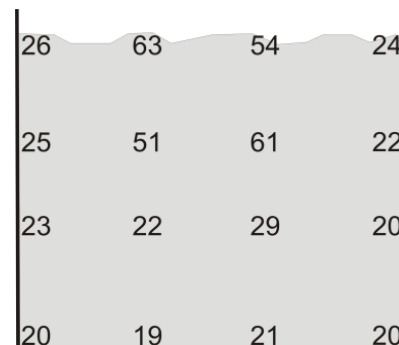


Abb. 4-10: Temperatur (Angaben in [°C]) in einem druckbelüfteten Containerkompostierungssystem (Querschnitt: 1,9 x 1,5 m) [Scholwin, 2005]

Bei einer Containerkompostierung sind die Temperaturen an den Rändern ebenfalls niedriger als im Kern und über der Höhe nur gering verändert. Die Abb. 4-10 zeigt im Querschnitt, dass die Temperatur der Randbereiche zusammen mit der Bodenregion etwa das Niveau der Zulufttemperatur hat und somit signifikante Unterschiede zum Kern bestehen. An der Oberfläche sind die Werte stets höher als in der Tiefe, wobei im Haufwerkskern vertikal ein ausgeprägter Temperaturgradient vorliegt. Die Abweichungen zur Rottebox begründen sich daraus, dass die Box entgegen der üblichen Situation nach oben offen ist und im vorliegenden Fall eine Abkühlung auf der Oberfläche erfolgen kann. Zudem ist die Rottebox laut Angaben intervallbelüftet, während beim Container ein kontinuierlicher Betrieb des Ventilators zu vermuten ist.

In Kompostierungsmieten befördert eine kontinuierliche Belüftung ein inhomogenes Temperaturfeld, weil direkt angeströmte Bereiche kühler werden [Rynk, 1992]. Für Container dürfte dasselbe gelten. Orientierende Berechnungen in [Scholwin, 2005] zeigten hingegen, dass sich die Lufttemperatur selbst bei sehr großen Temperaturunterschieden zwischen Zuluft und Haufwerk schon nach 1 bis 2 cm Strömungsweg der Materialtemperatur angeglichen hat. Die Auswirkungen bei längerfristiger Einwirkung und von Vorzugsströmungswegen wurden nicht diskutiert. Nach [Ekinci et al., 2006] können Rottesysteme mit Umluftführung, d.h. wenn die Abluft gesamt oder teilweise als Zuluft zurück in den Reaktor gelangt, Temperaturgradienten von weniger als 2 K über der Haufwerkshöhe erzielen. Nähere Erläuterungen zu den Simulationsergebnissen liegen nicht vor. Physikalische Zusammenhänge widersprechen dieser Aussage, weil Umluft ohne Kondensation eine Wärmeabfuhr nicht erfüllen kann.

In [Sesay et al., 1998] erfolgten Untersuchungen zur aeroben Behandlung von zerkleinertem Restabfall in einem hybriden Betrieb aus Saug- und Druckbelüftung. Hierzu wurde eine Miete über perforierten Schläuchen aufgebaut. War die Temperaturdifferenz ($T_{\text{oben}} - T_{\text{unten}}$) in der Miete positiv, wurde saug- und für den umgekehrten Fall druckbelüftet. Hierdurch wurde der vertikale Temperaturgradient verringert und ein geringerer Feuchtigkeitsverlust registriert. Eine Erklärung hierfür liegt nicht vor und erscheint thermodynamisch nur dann sinnvoll, wenn es im saugenden Betrieb zu einer Kondensation von Wasser in den tiefen Bereichen kommt.

Nach [Bari, 2000] führt eine solche hybride Prozessführung neben einem homogenen Temperaturfeld auch zu verringerten vertikalen Gradienten bei der abgebauten organischen Trockensubstanz. Die Wirkung ist fraglich, weil die Strömungsgeschwindigkeit an den Belüftungsöffnungen bei der Druckbelüftung sehr groß ist, und eine derartige Intensität beim Saugen zu Verstopfungen der Öffnungen führt. Bei Verringerung der Intensität kann zwar die Sauerstoffversorgung, aber nicht die Wärmeabfuhr gewährleistet werden.

Zusammenfassung

Der Wärmehaushalt wird durch biochemische Abbauprozesse, äußere Einflüsse und die Konzeption des technischen Systems beeinflusst. In einem geschlossenen, druckbelüfteten Haufwerk ist das Temperaturfeld inhomogen mit den größten Werten nahe der Oberfläche und niedrigeren Werten am Boden. Horizontale Gradienten im Querschnitt sind Folge von Wärmeverlusten an den Wänden. Horizontale Gradienten über der Reaktorlänge als Folge vieler im Haufwerk vorliegender Chargen wurden ebenso wie vertikale Gradienten als Folge der Belüftung nicht ausreichend in der Literatur diskutiert. Untersuchungen zum Wärmehaushalt sind nur für die Kompostierung, aber nicht für MBA-Anlagen bekannt. Im Haufwerk können nach der Beschickung typische Werte von 55 °C bereits nach maximal 24 h erreicht werden. Die veröffentlichten Größenordnungen zur Wärmefreisetzung sind substratabhängig und weisen auch je Substrat große Unterschiede auf. Es sind deshalb nur anlagenspezifische Aussagen möglich und Untersuchungen direkt in den Rotteraktoren erforderlich.

4.3 Wasserhaushalt

Wassergehalt

Wasser stellt aufgrund seiner Doppelfunktion in den Stoffwechselvorgängen und als Kühlmedium bei gleichzeitig engem Spektrum günstiger Milieubedingungen eine wichtige Prozessgröße biologischer Verfahren dar [Bröker et al., 2000]. Eine Wassersättigung des Materials wird insbesondere durch eine ungünstige Zusammensetzung des Haufwerkes mit wasserhaltigen und strukturarmen Stoffen hervorgerufen. Dagegen ist eine Austrocknung des Haufwerkes die Folge einer falschen Steuerung des Rotteprozesses [Kämpfer, 2001]. Untersuchungen zum Wasserhaushalt liegen für Rotteraktoren nicht oder nur begrenzt vor, sondern v.a. für die Mietenkompostierung (z.B. am Großlysimeter in [Franke & Degener, 2003]).

Der Wassergehalt von Restabfall zeigte sich in Untersuchungen in Bayern mit 37 %. Hierzu trugen zu 80 % die Fraktionen Organik, Mittelfraktion (Korngröße 10 - 40 mm, enthält viel Organik) und Hygieneprodukte bei [LfU Bayern, 2008]. Für MBA-Inputmaterial (< 40 mm) lagen die Werte zwischen 35 und 45 % [Fricke & Müller, 1999]. Eine plausible Ursache für die Spanne ist der Unterschied im Organikanteil (siehe 4.1, S. 27 f.), weil die Wasseraufnahmefähigkeit solcher Komponenten signifikant höher als von mineralischen Komponenten oder übrigen Stoffen (z.B. Folien) ist. So liegt der Wassergehalt für Küchenabfälle bei 40 bis 75 % und für Gartenabfälle bei 40 bis 85 % [Bidingmaier & Denecke, 1998]. Bei Bioabfall insgesamt liegt der Wassergehalt üblicherweise um 50 % [Hupe et al., 2000]. Aussagen zur Quantität sind somit nur durch ein Spektrum und nicht als konkreter Wert möglich.

Der aerobe Abbau kann durch einen Mangel oder einen Überschuss an Wasser verlangsamt bzw. abgebrochen werden. Zu viel Wasser behindert den Sauerstofftransport, da die Diffusion in Wasser gering ist, führt zu anaeroben Bedingungen und verhindert die erwünschte Selbsterwärmung [Miller, 1989]. Eine nachhaltige Schädigung der Mikroorganismen tritt trotz eines Abbruchs nicht ein [Scholwin, 2005]. Die Tab. 4-2 zeigt Literaturdaten zu Größenordnungen eines minimalen Wassergehaltes von kleiner 20 bis 45 % und eines optimalen Wassergehaltes von 45 bis 60 %. Der maximale Wassergehalt wird durch die Wasserkapazität des Materials vorgegeben und liegt nur geringfügig über dem Optimum (Literaturdaten siehe Tab. 4-3).

Tab. 4-2: Literaturdaten zum Minimum und Optimum beim Wassergehalt in Rotteprozessen

Wassergehalt	Erläuterung laut Quelle	Quelle
<u>Minimum</u>		
< 30 bis 45 %	Hemmung des Abbaus	[Kämpfer, 2001]
< 25 bis 40 %*)	Erhebliche Reduktion der mikrobiellen Aktivität	[Scholwin, 2005]
< 20 %	Abbau kommt nahezu zum Erliegen	[Scholwin, 2005]
<u>Optimum</u>		
45 bis 50 %	Bioabfallreiches Rottegut	[BMLFUW, 2005b]
45 bis 60 %	Grünschnittreiches, d.h. strukturreiches Rottegut	[BMLFUW, 2005b]
45 bis 55 %	Bei MBA-Material nahe der Wassersättigung	[Fricke & Müller, 1999]

* bzw. bei < 20 % der maximalen Wasserkapazität

[Bidlingmaier & Denecke, 1998] stellten den Einfluss des Wassergehaltes auf die mikrobielle Aktivität als parabelförmige Funktion dar. Die Aktivität wird dabei als maximale gemessene Rottetemperatur aufgefasst. Gemäß der Abb. 4-11 liegt das Maximum der Parabel bei 65 % Wassergehalt. Am Verlauf wird deutlich, dass Wassergehalte unter dem Optimum zwar die Aktivität verringern, aber nicht prozessgefährdend sind. Oberhalb des Optimums ist ein Umschlag in den anaeroben Bereich jedoch rasch möglich (sehr schnelles Absinken der Temperatur). Zur Untersuchungsmethode und dem konkreten Stoffsystem fehlen Angaben.

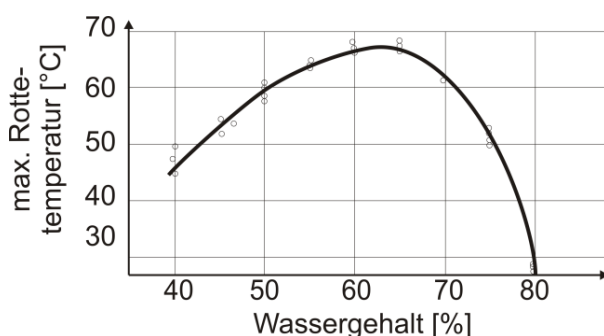


Abb. 4-11: Einfluss des Wassergehaltes auf die Atmungsaktivität gemessen als maximale Rottetemperatur [Bidlingmaier & Denecke, 1998]

In Untersuchungen an einem Substrat aus Bio- und Grünabfall erfolgte der maximale Abbau der organischen Fraktion bei niedrigem Wassergehalt und hohem C/N-Verhältnis oder dem umgekehrten Fall. Das C/N-Verhältnis bezieht die Masse des gesamten organischen Kohlenstoffs auf die Stickstoffmenge. Die Versuche zeigten zudem eine Beeinflussung des pH-Wertes durch den Wassergehalt. Bei hohen Gehalten sinkt der Wert zunächst wie üblich auf die Größenordnung von 4 bis 5 ab, steigt aber im Gegensatz zum regelkonformen Prozess

anschließend nicht in den basischen Bereich, sondern verbleibt auf niedrigem Niveau und hat damit negative Auswirkungen auf den Rotteprozess [Kumar et al., 2010]. Der pH-Wert wird u.a. durch den Anteil leicht abbaubarer Substanzen im Substrat beeinflusst.

Die als Zielwert festgelegten Größenordnungen für den Wassergehalt können sich über der Behandlungszeit ändern. So kann es durch Setzungserscheinungen oder die abbaubedingte Abnahme des Feststoffanteils zu einer Verringerung des optimalen Wassergehaltes kommen [Richard et al., 2002]. Der Optimalbereich sinkt im Verlauf der Rotte durch die Mineralisierung der organischen Substanz und abnehmender Wasserkapazität von 55 bis 75 % zu Rottebeginn auf 35 bis 45 % zum Ende [BMLFUW, 2005b].

Wasserkapazität und Wassertransport

Die maximale Wassermenge, die eine Substanz aufnehmen kann, wird durch die materialabhängige Wasserkapazität, d.h. das Wasseraufnahmevermögen der Kapillaren, bestimmt [Kämpfer, 2001]. Allgemein nimmt organisches Material Wasser über die Oberfläche nur langsam auf, wobei Abfälle mit einem Wassergehalt kleiner 30 % sogar hygroskopisch wirken können [Scholwin, 2005]. Die Tab. 4-3 zeigt Literaturdaten zur Wasserkapazität.

Tab. 4-3: Literaturdaten zur Wasserkapazität von organischem Material

Substrat	Wasserkapazität	Quelle
Hausmüll	55 bis 65 %	[Kutzner & Jäger, 1994]
Bioabfall; Gartenabfälle mit viel Grünschnitt	50 bis 55 %	[Kutzner & Jäger, 1994]
Bioabfall	50 %	[Kraft, 2001]
Klärschlamm und Holzhackschnitzel	60 %	[Miller, 1989]

Mit 50 bis 65 % ist die Spannweite an Werten sehr groß. Es existiert eine ausgeprägte Abhängigkeit vom spezifischen Stoffsystem, so dass die Größenordnungen aus Literaturdaten nur bedingt anwendbar sind. Zudem sind Informationen zur Bestimmungsmethode häufig nicht bekannt. Beispielsweise ermittelte [Kraft, 2001] mit seiner Methode sogar Größenordnungen niedriger als der Ausgangswassergehalt.

Ist die Kapazität überschritten, kann Wasser nicht mehr gespeichert werden und fließt ab. Der so definierte Sättigungswassergehalt wird durch das haufwerkstechnische Verhalten der Schüttung (Setzung) beeinflusst. Mit der Wassersättigung der Bodenregion kommt es zum Flüssigkeitsaustritt aus dem Haufwerk. Grundsätzlich können aerobe Verfahren jedoch abwasserfrei betrieben werden [Soyez et al., 2000]. Auch beim MBA-Prozess treten aufgrund des geringen Wassergehaltes von Restabfall kein oder nur in sehr geringen Mengen Press- oder Sickerwasser auf [Fricke & Müller, 1999]. Presswasser entsteht mit bis zu 0,020 kg je kg Feuchtmasse hauptsächlich in der Anlieferung [ÖWAV, 2009]. In Wirklichkeit ist aufgrund der Zusammensetzung des Rottegutes (hoher Anteil Organik) und der hohen Schütthöhen bei fehlendem Strukturmaterial die Entstehung von Presswasser zu erwarten.

Für den Erd- und Grundbau existieren Messmethoden als Laborversuch, um das Aufnahmevermögen der Feinbestandteile eines Bodens zu ermitteln¹³. Für Restabfall sind diese Me-

¹³ vgl. DIN 18132: „Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens“ mit einem Wasseraufnahmegesäß

thoden aufgrund der Heterogenität des Stoffsystems nicht geeignet. Zugleich werden in einem Haufwerk lokal verschiedene Zustände bestehen, die durch solche Methoden nicht erfasst werden. Allgemein liegen über die Wasserkapazität verschiedener organischer Stoffe und über die Veränderung dieser Kenngröße während des Rotteprozesses nicht genügend Kenntnisse vor. Von Veränderungen wird jedoch ausgegangen [Scholwin, 2005], was sich in Empfehlungen zur Anpassung des optimalen Wassergehaltes widerspiegelt.

Der Wassertransport im Haufwerk zeigt sich bei Sättigung und bei Bewässerung. Für Rottegut sind über die Vorgänge und deren Einflussfaktoren keine Untersuchungen bekannt. Die Informationen beschränken sich auf Werte zur hydraulischen Durchlässigkeit (k_f -Wert) und auf in Deponien eingebautes MBA-Material und sind deshalb unbrauchbar. Allgemein lassen sich Sickerströmungen in porösen Medien mathematisch durch die Richards-Gleichung beschreiben. Sie enthält die Kontinuitätsgleichung und das Darcy-Gesetz [Zambra et al., 2011]. Die diskutierten Schwierigkeiten bei der Darstellung des Stoffsystems (vgl. 4.1.1, S. 23 ff.) gewährleisten keine realistische Wiedergabe. Zugleich kommt es in Hausmülldeponien durch Makroporen im Haufwerk zur Ausweitung von Wasserströmen zu Fließwegen Richtung Basisdrainage [Entenmann & Wendt, 2005]. Ähnliche Effekte sind auch für Rotteguthaufwerke vorstellbar.

Wasserfreisetzung durch biologische Abbauvorgänge

Die biochemischen Prozesse führen zur Freisetzung von Wasser im Haufwerk (vgl. Gleichung (2-1), S. 7). Aufgrund des höheren Kohlenstoffanteils in der organischen Substanz von MBA-Rottegut gegenüber Glukose entstehen anstatt 1 mol aber nur etwa 0,4 mol Wasser je mol gebildeten Kohlenstoffdioxids [Kaiser & Soye, 2000]. Bei der Freisetzung kann von Größenordnungen zwischen 0,6 und 0,75 kg Wasser je kg abgebauter organischer Trockensubstanz ausgegangen werden [Scholwin, 2005]. Eine Übersicht über das durch Metabolismus produzierte Wasser verschiedener Stoffsysteme (Abfall, Reisspelzen, Stroh/ Hühnermist) von [Miller, 1991] zeigte Werte zwischen 0,5 und 0,6 kg je kg abgebauter Substanz. Nach [ÖWAV, 2009] fällt bis zu 0,080 kg Wasser je kg Feuchtmasse an und überwiegend während der Intensivrotte. In der vorliegenden Arbeit wird in den Ausarbeitungen zum Wassergehalt in 6.4 (S. 97 ff.) diskutiert, ob die aufgeführten Größenordnungen einen wesentlichen Beitrag zum Wasserhaushalt leisten.

Einfluss der Belüftung

Mit der Belüftung von Haufwerken ist ein Ein- und Austrag von luftgetragenen Wasser verbunden. Die Abb. 4-12 stellt am Beispiel einer Intensivrotte (Tunnelrotte) die Wassermengen in Abhängigkeit der Ablufttemperatur und bei unterschiedlichen Eigenschaften der Zuluft dar. Weil in Rottemieten mit Wassergehalten von über 35 % nahezu eine temperaturabhängige Sättigung der Abluft angenommen wird [Scholwin, 2005], erhöht sich der Wasseraustrag aufgrund der Aufnahmekapazität der Luft exponentiell mit der Lufttemperatur. Wenn der Wassereintrag durch Zuluft konstant bleibt, resultiert aus der Differenz beider Kurven ein Wasserverlust im Haufwerk. Die Aussagen lassen sich verallgemeinern, wenn stattdessen auf das Mollier-h,x-Diagramm zurückgegriffen wird.

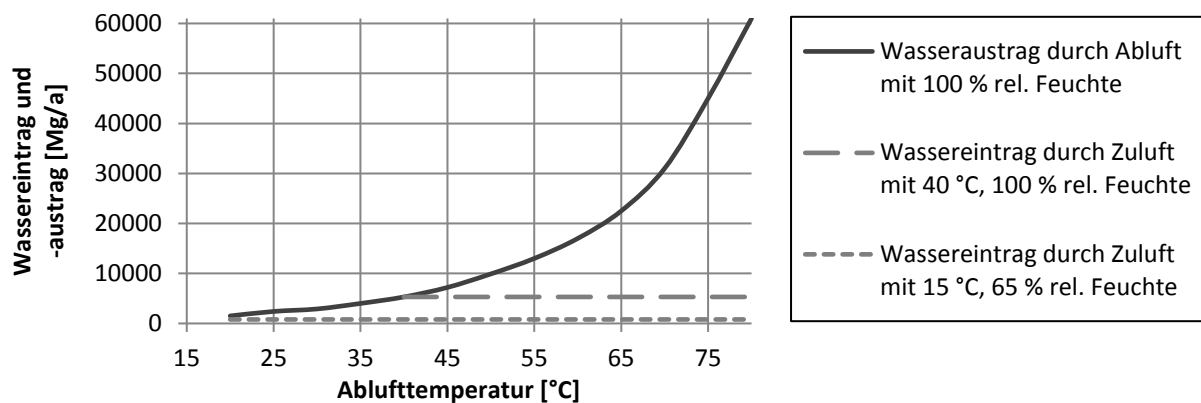


Abb. 4-12: Wassereintrag und Wasseraustrag in der Intensivrotte [Schrewe & Traue, 2008]

Berechnungen von [Kaiser & Soye, 2000] zeigten, dass der Wasserzugabebedarf zum Ausgleich der Verluste von der Anfangsfeuchte des Rottegutes abhängt und nur gering von der Prozessluftmenge beeinflusst wird. Es ergab sich vielmehr eine große Auswirkung der Luftmenge auf die Ablufttemperatur.

Der Wasseraustrag führt zu einer Austrocknung bestimmter Bereiche der Schüttung. In dem Versuchsreaktor ($d = 0,215 \text{ m}$, $H = 0,9 \text{ m}$) von [Scholwin, 2005] wurden Regionen im Haufwerk diesbezüglich untersucht. Die Bodenregion war infolge der einströmenden Zuluft durch Austrocknung und Abkühlung gekennzeichnet. Die visuelle Beurteilung zeigte eine Mächtigkeit von etwa 10 % der Gesamtschütthöhe. Die Deckregion wies dieselbe Mächtigkeit auf und zeichnete sich durch eine Zunahme des Wassergehaltes über der Versuchsdauer und eine leichte Abkühlung aus. [Das & Keener, 1996] bestimmten in einem aeroben Versuchsreaktor (6,1 m breit, 22 m lang, 3,1 m hoch) an mehreren Stellen den Wassergehalt. Das Material wurde mit einer Schütthöhe von 3 m und 58 % Wassergehalt eingebracht. Innerhalb von sechs Tagen reduzierte sich der Wert auf durchschnittlich 43 %, wobei sich über dem Querschnitt ein heterogenes Bild ergab. Die Ränder und die Mitte hatten geringere Werte (39,1 bis 44,9 %), während in den übrigen Bereichen größere Wassergehalte (42,7 bis 55,6 %) auftraten. Über der Höhe gab es sowohl am Boden als auch im oberen Bereich Stellen mit hohem oder niedrigem Wassergehalt. Die Ergebnisse müssen Folge einer ungleichmäßigen Durchströmung im Haufwerk sein. Zudem ist bei großen Haufwerken eine Heterogenität bzgl. der Anfangswassergehalte des Materials zu erwarten.

Zusammenfassung

Die publizierten Angaben zur Größenordnung des Wassergehaltes von Rottegut variieren stark und zeigen eine ausgeprägte Heterogenität als einzige verallgemeinerungsfähige Aussage. Mit 45 bis 65 % weisen die Empfehlungen für optimale Werte und mit 20 bis 45 % für den minimalen Wert jeweils eine große Spannweite auf. Die Unterschiede sind Folge der abweichenden Zusammensetzung verschiedener Rottegute. Der maximale Wassergehalt wird durch die Wasserkapazität des Materials vorgegeben und liegt nur geringfügig über dem Optimum. Für MBA-Material sind Informationen zur Wasserkapazität sowie zum Wassertransport und dessen Einflussfaktoren nicht bekannt. Die Auswirkungen der haufwerkstechnischen Effekte (Setzung) auf den örtlichen Wassergehalt werden nur qualitativ beschrieben. Die Freisetzung von Wasser durch den biologischen Abbau liegt bei 0,5 bis 0,75 kg je kg

abgebauter organischer Substanz. Ein Wasserverlust tritt durch Presswasser und stets durch die Belüftung ein. Der Wasserverlust erfolgt örtlich nicht gleichmäßig und befördert demnach eine Heterogenität im Wassergehalt des Haufwerks.

4.4 Prozessführung

Rottedauer

Für die Erzeugung biologisch aerob stabilisierter Produkte aus Restabfall wird ein Zeitraum der MBA von 8 bis 16 Wochen benötigt, wobei Intensiv- und Nachrotte jeweils 4 bis 8 Wochen lang sind [Soyez et al., 2001]. Andere Angaben gehen zum Erreichen der geforderten Stabilisierungsgrade von 8 bis 12 Wochen aus [Fricke & Turk, 2000]. Die Auswertung von Materialproben aus Intensivrottetunneln von MBA-Anlagen zeigte einen Zeitbedarf von 3 bis 5 Wochen zum Erreichen geforderter AT_4 -Werte [Lechner, 2010]. Dabei weichen die Messergebnisse untereinander teilweise stark ab und die Aussagekraft muss aufgrund der großen Rottegutmenge allgemein kritisch gesehen werden. Nach [Fricke & Müller, 1999] ist ein Hauptabbau der organischen Substanz von ca. 50 % oTS in Behandlungszeiträumen von 4 bis 6 Wochen Intensivrotte möglich. Mit einer anschließenden Nachrotte lassen sich die Ablagerungskriterien einhalten.

Prozessüberwachung und Prozessregelung

Bei der Kompostierung erfolgt die Prozessführung zu 40 % nach einem festen Temperaturwert und zu 60 % nach einer vorgegebenen Temperaturkurve. Dabei wird die Temperatur bei 65 % der Anlagen im Haufwerk und bei 65 % in der Abluft gemessen, wobei teilweise beide Varianten zum Einsatz kommen. Werden die Konzentrationen an CO_2 oder O_2 bestimmt, sind bei 75 % der Anlagen ein fester Grenzwert und bei den Übrigen eine Vorgabekurve hinterlegt. Nur in 15 % der Anlagen erfolgen die Gasanalysen mittels Messsonde im Haufwerk [Reitz, 1998]. Aufgrund der Ähnlichkeit mit der Kompostierung ist für MBA-Anlagen eine vergleichbare Prozessüberwachung anzunehmen. Daten hierzu sind nicht bekannt.

Nach [Bröker et al., 2000] zeigt sich zwischen Haufwerks- und Ablufttemperatur je nach örtlichen Gegebenheiten keine direkte Abhängigkeit, so dass beispielsweise die Werte in der Abluft teilweise deutlich niedriger lagen. Als Grund wurden die veränderlichen Einflüsse aus dem Witterungsverlauf genannt. Obwohl keine Erläuterungen vorliegen, kann nur der temperaturabhängige Wärmeverlust eine mögliche Erklärung sein. Der Autor schlussfolgert, dass die Prozessüberwachung durch direkte Kontrollen des Abbauvorgangs erfolgen muss, etwa anhand Mietenluftzusammensetzung, Haufwerkstemperatur, Wassergehalt sowie Atmungs- und Gärtests. Diskutiert wird nicht, dass die Überwachung eine Vielzahl verschiedener Zustände im Haufwerk nicht erfassen kann.

Bei Temperaturmessungen im Haufwerk muss das typische Temperaturfeld im Festbett berücksichtigt werden (vgl. Abb. 4-9 und Abb. 4-10, S. 38). Als Messstelle in einer aktiv belüfteten Rottemiete wird in [Rynk, 1992] eine Position bei 1/3 der Gesamthöhe und einer Mindestentfernung von der Haufwerksoberfläche von 45 cm angegeben. In der Haufwerkslänge

sollte die Position bei 2/3 der Länge vom einseitig installierten Ventilator entfernt liegen. Simulationen in [Ekinici et al., 2004] zeigten, dass bzgl. der Kriterien Trockenmasseverlust und Energieverbrauch eine Platzierung in der Mitte der Haufwerkshöhe am besten ist. Die optimale Stelle variiert mit der Sollwert-Temperatur des Prozesses, da sich z.B. die Prozessluftmenge mit zunehmendem Sollwert und höher liegender Messstelle verringert.

Der Zusammenhang zwischen Temperatur und biologischer Aktivität wird in [Scholwin, 2005] aus Veröffentlichungen zu getrennt erfassten organischen Abfällen und ähnlichen Stoffgemischen normiert in einem Diagramm dargestellt. Aufgrund des entstehenden Spektrums wird geschlussfolgert, dass „keine einheitliche Auffassung über günstige Temperaturbereiche und die Wirkung variabler Temperaturen bei der Kompostierung besteht“. In Untersuchungen von [Lechner, 2010] an MBA-Anlagen wirkte sich eine von 55 auf 60 °C angehobene Rottetemperatur positiv auf das Ergebnis aus. Der Autor schränkt jedoch ein, dass für das Ergebnis auch eine nicht repräsentative Probenahme verantwortlich sein könnte. Untersuchungen an Klärschlamm zeigten, dass der Effekt der Temperatur auf die biologische Aktivität bei der Kompostierung geringer ist, als der des Wassergehaltes [Liang et al., 2003].

Nach [Bertoldi et al., 1988] ermöglicht die Messung von Sauerstoff im Haufwerk eine gute Kontrolle und Steuerung des Prozesses sowie eine hohe Produktqualität. Die Sauerstoffversorgung kann gewährleistet, eine frühe Austrocknung des Materials verhindert und der Energieverbrauch gesenkt werden. Dagegen ist die Messung nach [Jäckel & Kämpfer, 2003] wenig aussagekräftig für die Sauerstoffversorgung, weil der Sauerstoff gelöst im Wasserfilm vorliegen muss und damit von der Diffusionsgeschwindigkeit, der Atmungsaktivität der Mikroorganismen und der Temperatur abhängig ist. [Bertoldi et al., 1988] empfehlen ein Niveau von 15 bis 20 % im Haufwerk. Genutzt werden jedoch überwiegend die Werte in der Abluft. Die Tab. 4-4 stellt hierfür Literaturdaten zum minimalen Sauerstoffgehalt zusammen und zeigt Werte zwischen 5 und 15 %.

Tab. 4-4: Literaturdaten zum minimalen Sauerstoffgehalt in der Abluft bei Rotteprozessen

O ₂ -Gehalt	Erläuterung laut Quelle	Quelle
< 5 %	Spürbar negative Auswirkungen	[Scholwin, 2005]
< 5 %	Erfahrungswert der Mietenkompostierung	[BMLFUW, 2005b]
< 10 %	Deutliche Verlangsamung des Prozesses	[Bidlemaier & Denecke, 1998]
< 15 %	Prozessverlangsamung	[Scholwin, 2005]

Nach Untersuchungen von [Doedens, 2001] hat der Sauerstoffgehalt in der Abluft dagegen nur einen geringen Einfluss auf das Prozessergebnis (ausgedrückt als Atmungsaktivität AT₄). Gemäß der Abb. 4-13 führen Gehalte zwischen 5 und 20 Vol.-% zu Unterschieden beim AT₄ von etwa 6 mg_{O₂}/g_{TS}. Dies ist wenig im Vergleich zum Einfluss der Rottedauer, wo beispielsweise innerhalb von sieben Tagen eine Verringerung um 45 mg_{O₂}/g_{TS} resultiert.

Die aufgeführten Größenordnungen für den minimalen Sauerstoffgehalt dürften nur langfristig relevant sein. Die Mikroorganismen stellen sich nur langsam auf neue Bedingungen ein, weshalb es bei Vorliegen einer kurzen anaeroben Zwischenphase im Rotteprozess (z.B. infolge eines Belüftungsstopps) nach dem Wechsel zu aeroben Verhältnissen wieder zu einer raschen Erhöhung der Aktivität kommt [Rheinbaben, 1976].

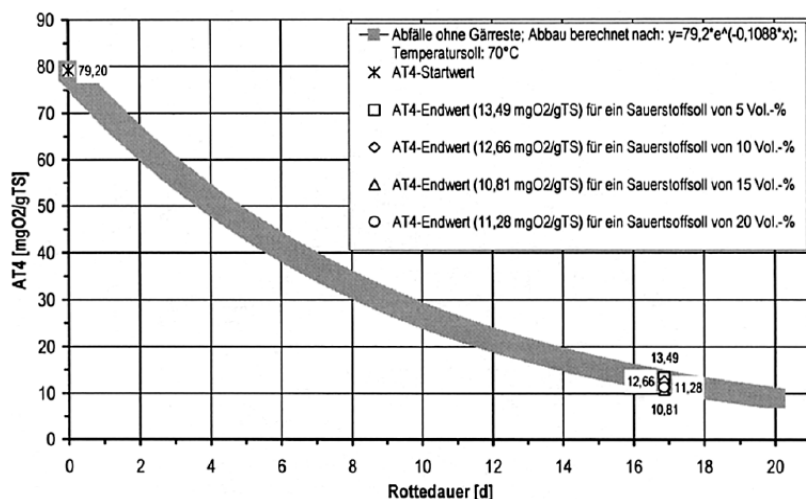
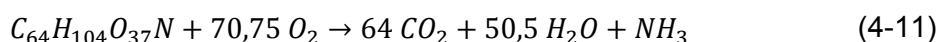


Abb. 4-13: Einfluss des O₂-Gehaltes in der Abluft auf den AT₄-Wert im Rottegut in Abhängigkeit der Rottedauer [Doedens, 2001]

Belüftung

Der Sauerstoffbedarf muss durch die Belüftung gedeckt werden und resultiert aus dem stöchiometrischen Verhältnis zur Oxidation des verfügbaren Kohlenstoffs. Unter Annahme der Gleichung von [Haug et al., 1977] für die organische Fraktion im Hausmüll



wird stöchiometrisch 1,53 g O₂ pro Gramm abgebauter organischer Substanz [g_{O2}/g_{oTS}] verbraucht, wobei der Sauerstoffverbrauch abhängig von der Rottedauer ist [Krogmann, 1994]. In der Praxis wird von ca. 2 g_{O2}/g_{oTS} ausgegangen, weil die Bereitstellung aufgrund eines nur teilweisen Verbrauchs höher liegen muss [Kämpfer, 2001]. Aus diesem Wert resultiert ein spezifischer Bedarf von 2,54 l_{Luft}/g_{TS} [Krogmann, 1994]. Die 2 g_{O2}/g_{oTS} führen für Kompost zu einem Sauerstoffbedarf von ca. 0,5 g_{O2}/g_{Frischmaterial}, was etwa 2 l_{Luft}/g_{Frischmaterial} entspricht [Bidlemaier & Denecke, 1998]. Die Tab. 4-5 zeigt Literaturdaten zu Belüftungsdaten.

Tab. 4-5: Literaturdaten zu Belüftungsdaten zur Deckung des Sauerstoffbedarfs

Substrat	Belüftungsrate	Quelle
organische Substanz allgemein	4 bis 7,2 l _{Luft} /(kg _{oTS} ·h)	[Kämpfer, 2001]
Müllkompost	6 bis 8 l _{Luft} /(kg _{TS} ·h)	[Fertig, 1981]
Kompost	23 bis 75 l _{Luft} /(kg _{TS} ·h)	[Gray et al., 1971]
Frischer und angerotteter Kompost	3,7 bis 7,5 l _{Luft} /(kg _{TS} ·h)	[Niese, 1959]
Kompost aus Hausmüll	1,1 bis 2,8 l _{Luft} /(kg _{oTS} ·h)	[Jeris & Regan, 1973]
MBA-Rottegut nach kurzer Intensivrotte	0,7 bis 1,0 l _{Luft} /(kg _{TS} ·h)	[Reinhardt, 1999]

Die Raten unterscheiden sich stark und verdeutlichen die Abhängigkeit von jeweils spezifischen Bedingungen. Zudem stellen sie meist Mittelwerte über der gesamten Versuchsdauer dar, obwohl die Belüftung an die sich verändernde Abbaugeschwindigkeit anzupassen wäre. Die Anwendung der Werte ist nur unter Kenntnis der abgebauten Stoffmenge möglich.

Der Luftbedarf ist für MBA- und MBS-Verfahren zwischen 15.000 und 35.000 m³_{Luft}/Mg Inputmaterial anzusetzen. Durch Kreislaufführung der Luft kann der Bedarf auf weniger als

3.000 m³/Mg reduziert werden, wobei diese Menge schon den Luftbedarf anderer Anlagenbereiche mit enthält [Wiemer, 1999]. Bei der Menge für die Rotte ist zu berücksichtigen, dass nicht nur der Sauerstoffbedarf, sondern vor allem der notwendige Wärmeaustag die Belüftungsintensität bestimmt. Für eine temperaturgesteuerte Prozessführung sind in der Intensivrotte zwischen 10 und 20 m³_{Luft}/(m³·h) notwendig. Untersuchungen zeigten, dass andernfalls die Luftzufuhr nicht optimal gesteuert werden kann und starke Temperaturschwankungen im Haufwerkskern auftreten [Fricke & Müller, 1999]. Laboruntersuchungen mit MBA-Material zeigten bei Maximalluftmengen zwischen 6,5 und 8 m³/(Mg·h) optimale Abbaubedingungen. In der Praxis treten Luftmengen zwischen 4 und 31 m³/(Mg·h) und bei Bioabfallrotteanlagen bis zu 60 m³/(Mg·h) auf, wobei die Abbauraten sehr viel geringer sind [Lechner, 2010].

Der Unterschied zwischen Labor und Praxis macht deutlich, dass ideale Bedingungen nicht annähernd erreicht werden können. Hinzu kommt, dass die Bewertung bei [Lechner, 2010] durch Bestimmung der AT₄ von Proben erfolgte, was aufgrund der Heterogenität des Haufwerks Fehler wahrscheinlich macht. Der Autor geht als Lösung für die Abweichungen von einer Änderung der Inputmenge und frühere Umsetzzeitpunkte aus. In einem Versuch mit geringerer Schütthöhe (2/3 der Ursprungshöhe) wurden bessere Werte erzielt und dies mit einer intensiveren und gleichmäßigen Sauerstoffversorgung begründet.

Die Abb. 4-14 stellt den Luftbedarf für biologische Abbauprozesse in MBA-Anlagen für einen bestimmten Abbaugrad der oTS dar [Doedens, 2002]. Die vier Kurven beruhen auf einer unterschiedlichen Entnahme heizwertreicher Fraktionen in der physikalischen Aufbereitung vor der Rotte.

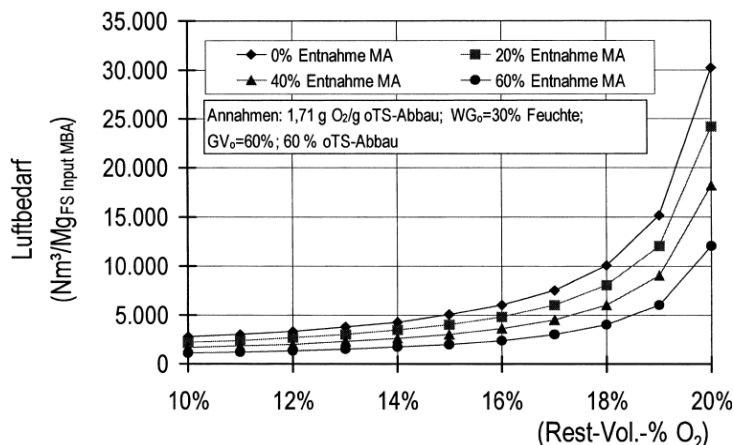


Abb. 4-14: Erforderlicher Luftbedarf in Abhängigkeit des Rest-Vol.-% an O₂ und unterschiedlicher Entnahme heizwertreicher Fraktionen [Doedens, 2002]

Der spezifische Luftbedarf muss demnach überproportional erhöht werden, je größer der angestrebte Restgehalt an Sauerstoff in der Rotteabluft ist. Über die Bestimmungsmethode (vermutlich Modellierung) liegen keine Angaben vor. Entsprechend der Ergebnisse aus der Abb. 4-13, wo sich der Abbaugrad nahezu unabhängig vom Sauerstoffgehalt zeigte, wäre demnach eine signifikante Verringerung der Belüftungsintensität möglich. In der Realität muss die Anpassung durch Berücksichtigung der notwendigen Wärmeabfuhr geringer ausfallen. Dieser Aspekt wird in die Diskussionen häufig nicht mit einbezogen.

Zusammenfassung

Die Prozessführung beruht auf den spezifischen Bedingungen und lässt allgemein verbindliche und übertragbare Vorgaben nicht zu. Die Angaben zur Rottedauer von 3 bis 16 Wochen unterscheiden sich stark. Die Überwachung des Prozesses erfolgt bei der Mehrzahl der Anlagen durch Temperaturmessungen im Haufwerk und in der Abluft. Einheitliche Auffassungen zur optimalen Temperatur im Haufwerk bestehen nicht. Die Aussagekraft der Sauerstoffkonzentration kann begrenzt sein, weil nur der in der Flüssigkeit gelöste Sauerstoff prozessrelevant ist. Eine Unterschreitung der O_2 -Konzentration von 5 bis 15 % sollte wegen der Prozessverlangsamung verhindert werden. Für den Sauerstoffbedarf existiert ein Richtwert von $2 \text{ g}_{O_2}/\text{g}_{\text{OTS}}$. Die Angaben zur Belüftungsintensität weisen generell und für spezielle Substrate eine große Spannweite auf. Insgesamt wurde unzureichend diskutiert, dass die Schwierigkeit der Sauerstoffversorgung weniger in der ausreichenden Bereitstellung besteht. Vielmehr stellen sich die Versorgung aller notwendigen Stellen im Haufwerk und die jeweils für den Einzelfall anzupassende Wärmeabfuhr als Hauptaufgabe dar. Veröffentlichungen zur Prozessführung von Rottesystemen mit Umluftführung liegen nur wenige vor, obwohl sie häufig eingesetzt werden.

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Verfahrensbeschreibung der MBA-Anlage

Das Betriebsverhalten statischer Rottereaktoren wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung an einer typischen in Betrieb befindlichen Anlage untersucht. Die Anlage ist typisch für die Konzeption und Technologie und deshalb für eine systematische Analyse der Vorgänge geeignet. Der Abfall wird in einer physikalischen Stufe für die Rotte vorbereitet und hierbei Wert- und Störstoffe entfernt (Teilstrombetrieb). Die biologische Behandlung erfolgt in zwei nacheinander folgenden Prozessstufen mit den am meisten verbreiteten Konzepten:

- Intensivrotte in Tunnelreaktoren
- Nachrotte in aktiv belüfteten Mieten

Entsprechend der Zielstellung der Arbeit beziehen sich die Untersuchungen auf den statischen Rottereaktor und damit auf die Intensivrotte. Im Folgenden wird dieser Anlagenteil beschrieben.

Die MBA-Anlage besitzt eine Kapazität von 180.000 Mg/a kommunaler und gewerblicher Siedlungsabfälle. Der Abfall entstammt einem weiten Einzugsgebiet mit unterschiedlichen Bebauungsformen (großstädtisch bis ländlich) und weist eine typische Wochengangkurve auf. Die biologische Behandlung in der Intensivrotte erfolgt in statischen Reaktoren in Form von 30 Rottetunneln, wobei die Tunnelfüllung und -leerung automatisiert ablaufen. Im stationären Betrieb beträgt der Massenstrom an Rottegut etwa 60 Mg/h.

Die Abfallanlieferungen erfolgen von Umladestationen in den jeweiligen entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften. Die Container werden in der Anlieferungshalle der Anlage entladen und der Abfall in Form eines Flachbunkers für die Verarbeitung zwischengespeichert. Der Einsatz von Radladern ermöglicht eine Mischung verschiedener Chargen einer Abfallart und eine Vorsortierung, z.B. die Entfernung von Grobstoffen oder schadstoffverdächtiger Gegenstände. Es existieren Lagerflächen für die Haushalts- und Geschäftsabfälle (kurz: Restabfall) sowie für Sperrmüll/hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (kurz: Sperrmüll). Die letztgenannte Abfallart macht etwa 15 % der angelieferten Gesamtmenge aus. Beide Abfallarten werden in unterschiedlichen Linien aufbereitet, wobei für Sperrmüll eine und für Restabfall zwei Linien zur Verfügung stehen. Die Feinfraktion des Sperrmülls dient optional als Rotteinput. Der Restabfall erfährt stets eine aerobe Behandlung, weshalb die Abb. 5-1 das Verfahrensschema der physikalischen Aufbereitung dieser Linie darstellt.

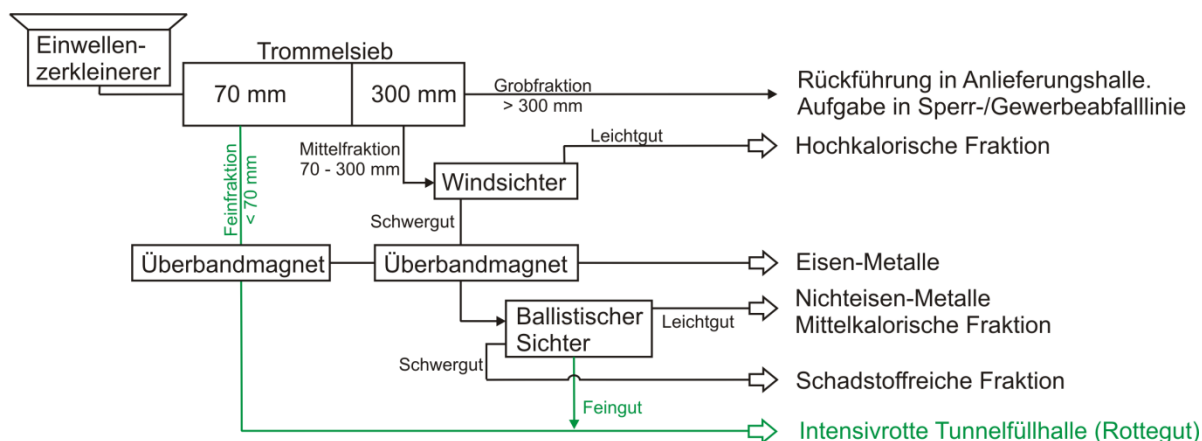


Abb. 5-1: Verfahrensschema der physikalischen Aufbereitung der Restabfalllinie

Zur Beschickung der Anlage wird der Abfall aus dem Flachbunker mittels Polypgreifern diskontinuierlich dem Aufgabetrichter des Vorzerkleinerers zugeführt. In der Restabfalllinie werden ein Einwellenzerkleinerer und in der Sperrmülllinie eine Rotorschere eingesetzt. Die Klassierung der Abfälle erfolgt anschließend mittels Polygonsieben in die Größenklassen größer 300 mm (Grobfraktion), 70 bis 300 mm (Mittelfraktion) und kleiner 70 mm (Feinfraktion). Die Grobfraktion wird zurückgeführt und erneut zerkleinert. Aus der Mittelfraktion werden in weiteren Prozessschritten (Windsichtung, Eisenabscheidung, Ballistische Sichtung) Wert- und Störstoffe separiert. Die Feinfraktion des Polygonsiebes stellt nach der Eisenabscheidung ebenso wie das Feingut des ballistischen Sichters das Rottegut dar und wird zur Intensivrotte in die sogenannte Tunnelfüllhalle verbracht.

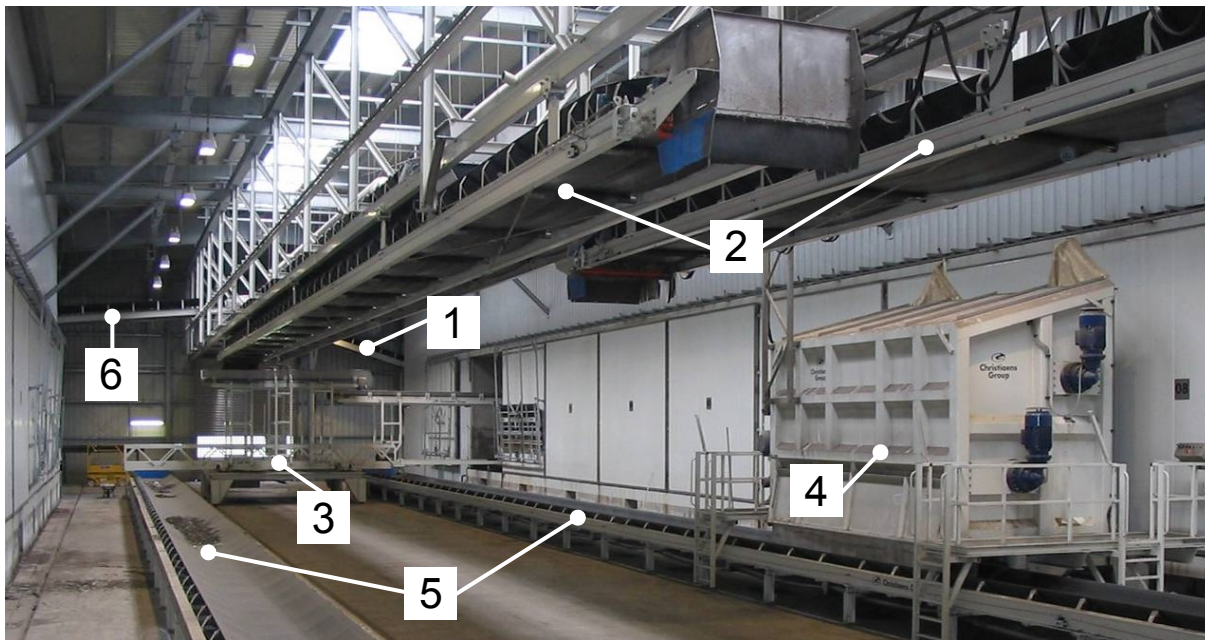


Abb. 5-2: Tunnelfüllhalle mit Tunnelreihen: Transportband Beschickung (Nr. 2), Eintragsmaschine (Nr. 3), Austragsmaschine (Nr. 4), Transportband Leerung (Nr. 5) [IVU, o.J.]

Der Transport des Rottegutes zur Intensivrotte erfolgt über ein größtenteils unabgedecktes stationäres Förderbandsystem mit mehreren Übergabestellen. In der Konzeption der Anlage war für den Stoffstrom das Passieren einer Homogenisierungs- und Bewässerungstrommel vorgesehen. Sie wurde im Normalbetrieb nie für längere Zeit genutzt und schließlich vom

Stoffstrom umfahren, so dass keine weitere Konditionierung des Rottegutes erfolgt. Der Stoffstrom gelangt in die Tunnelfüllhalle, in welcher sich zwei aus jeweils 15 Rottereaktoren bestehende Tunnelreihen gegenüber liegen (siehe Abb. 5-2). Die Tunnelöffnungen zeigen in die Halle und befinden sich etwa 1 m über dem Hallenboden. Im Raum zwischen beiden Reihen ist teils mobile und teils stationäre Technik zur Beschickung und Leerung der Reaktoren installiert. Der Raum über den Tunneln ist von der Halle durch Wände abgetrennt.

Die Beschickung der Tunnel erfolgt weitgehend automatisiert mittels einer in Hallenlängsrichtung schienengeführten Eintragsmaschine, von denen zwei Stück in der Anlage zur Verfügung stehen. Hierzu gelangt das Rottegut aus der physikalischen Aufbereitung über ein Steigband (siehe Abb. 5-2, Nr. 1) in Richtung Hallendecke zu einem von zwei verfahr- und reversierbaren Transportbändern (Nr. 2). Die Bänder werden jeweils auf eine der beiden Eintragsmaschinen (Nr. 3) ausgerichtet und der Stoffstrom über Eintragsbänder der Maschine in den Tunnel befördert. Hierzu ist auf dem schienengeführten Fahrwerk ein Drehkranz montiert, um beide Tunnelreihen erreichen zu können. Vom Drehkranz wird ein Kopfwagen über eine klappbare Brücke in den Tunnel gefahren und das Rottegut über die Eintragsbänder in den Tunnel transportiert (siehe Abb. 5-3 links).



Abb. 5-3: Eintragsmaschine im Rottetunnel: Kopfwagen mit Eintragsband (links) und Steigbandförderer mit Steuerklappe (rechts) [IVU, o.J.]

Der Kopfwagen besitzt am Ende einen schwenkbaren und höhenverstellbaren Steigbandförderer (siehe Abb. 5-3 rechts). Mit diesem Schleuderband wird der Rottetunnel nach manueller Startaufstellung des Wagens horizontal von hinten nach vorn Richtung Tunneltor automatisiert beschickt. Mittels einer beweglichen Klappe am Ende des Steigbandes wird hierzu die Ausbildung des resultierenden Böschungswinkels und damit die Haufwerkshöhe automatisch erfasst und daraufhin ein Schwenken des Bandes bzw. ein selbständiges Zurücksetzen des Kopfwagens eingeleitet. Nach vollständiger Füllung wird der Rottetunnel verschlossen.

Der Aufbau des Rottereaktors ist in der Abb. 5-4 dargestellt. Die Länge eines Tunnels beträgt 30 m bei einer Querschnittsfläche von 5 m Breite und 4,5 m Höhe. Die Tunnelöffnung ist durch ein Tunneltor verschließbar. Das Rottegut liegt auf dem Belüftungsboden. Der Bereich darunter wird als Belüftungsraum, das Freivolumen über dem Rottegut als Abluftraum bezeichnet. An der Decke des Abluftraumes sind zwei Düsenleisten installiert, um das Haufwerk während des Rotteprozesses zu bewässern.

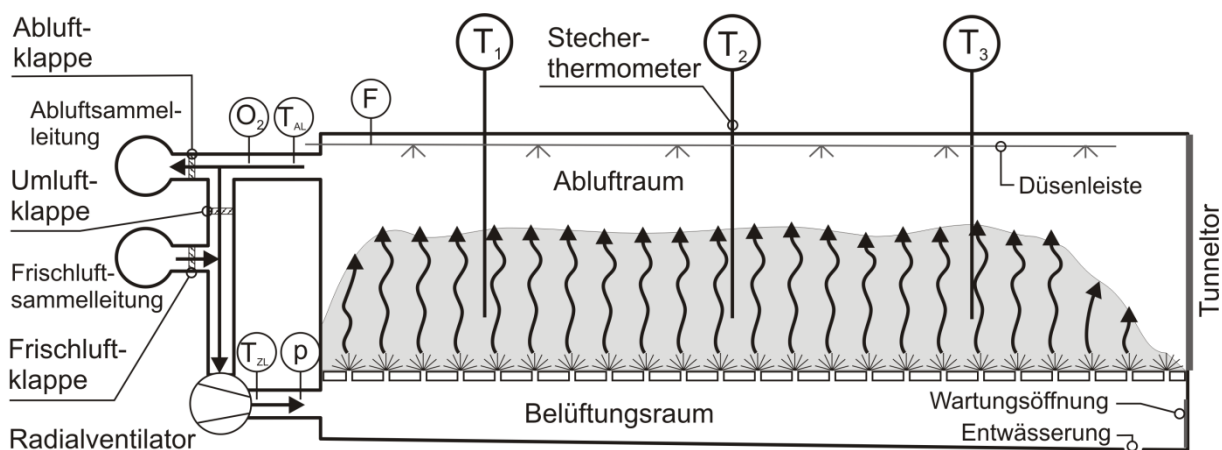


Abb. 5-4: Rottetunnel (Längsschnitt) der untersuchten MBA-Anlage

Der Belüftungsboden besteht aus Betonelementen mit konisch nach unten erweiterten Öffnungen von ca. 50 x 25 mm (siehe Abb. 5-5). Der Lochmittenabstand in Längsrichtung beträgt 135 mm und in Querrichtung 270 mm. Die Öffnungen sind bis auf verschlossene schmale Streifen am linken und rechten Rand von jeweils 360 mm gleichmäßig verteilt. Durch Optimierungsarbeiten der TU Dresden im Vorfeld der vorliegenden Arbeit wurde festgestellt, dass die Belüftungsöffnungen am hinteren (2 m) und vorderen Ende des Bodens (2,90 m) zu verschließen sind und unwirksam werden.

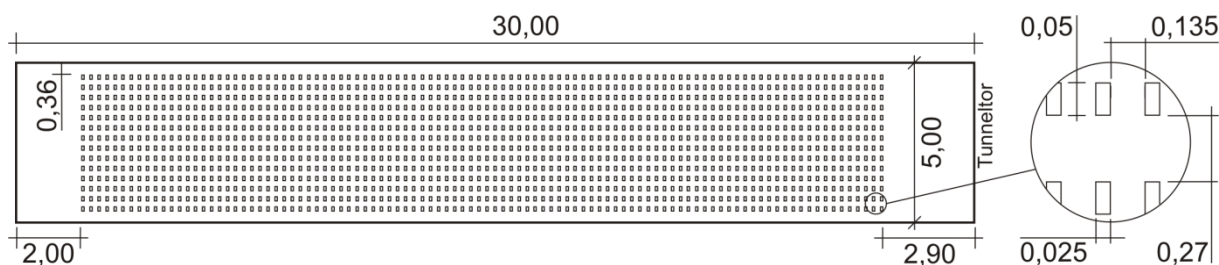


Abb. 5-5: Belüftungsboden eines Rottetunnels (Draufsicht), Nennmaße in [m] (links: Gesamtansicht, rechts: Detail Belüftungslöcher)

Außerhalb des Belüftungsraumes und mit Anschluss zu diesem ist ein per Frequenzumrichter gesteuerter Radialventilator zur Zuluftförderung platziert, dessen Leistungssteuerung als Prozentangabe (0 bis 100 %) der Maximalleistung erfolgt. Als Zuluft für den Rottreaktor dient Frischluft, Reaktorabluft (Umluft) oder eine Mischung aus beiden (Mischluft). Die Unterschiede werden in der Abb. 5-6 verdeutlicht. Zur Konditionierung der Luft sind die Tunnel mit einer Umluftleitung und drei Jalousieklappen ausgestattet.

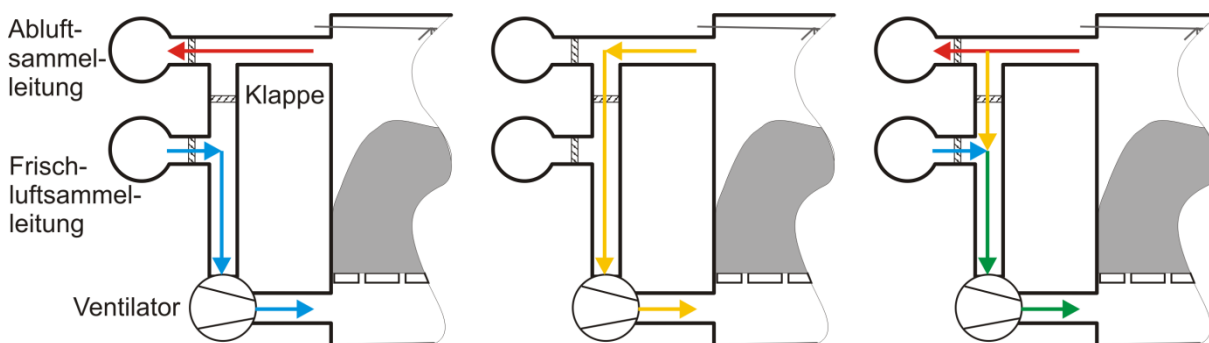


Abb. 5-6: Reaktorbetrieb mit Frischluft (links), Umluft (Mitte), Mischluft (rechts)

Die Umluftleitung ist durch zwei Abzweige mit einer Frischluft- und einer Abluftsammeleitung verbunden. Die Sammeleitungen sind an beiden Tunnelreihen verfügbar und dienen der Frischluftversorgung bzw. Abluftabfuhr von 15 Reaktoren. Die Abb. 5-7 zeigt die technische Realisierung an jedem Tunnel als Blick in den sogenannten Ventilatorgang hinter einer Tunnelreihe. Die Jalousieklappen sind in den Abzweigen und in der Umluftleitung installiert und dienen der Anpassung der Zuluftzusammensetzung. Sie werden entsprechend ihrer Position Frischluft-, Umluft- und Abluftklappe genannt. Der Öffnungsgrad der Klappen wird als Prozentangabe (0 bis 100 %) angegeben und die Steuerung ist untereinander gekoppelt. Schließt beispielsweise die Klappe der Frischluft, schließt sich analog die der Abluft und es öffnet sich im selben Maße die der Umluft. Durch die temperaturabhängige Volumenzunahme ist die Abluftklappe stets stärker als die Frischluftklappe geöffnet.



Abb. 5-7: Prozessluftsystem Intensivrotte: Ventilatorgang [IVU, o.J.]

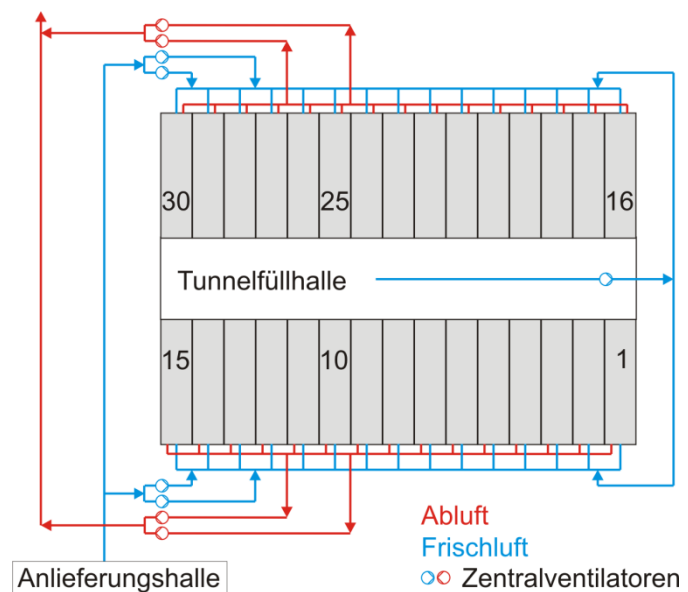


Abb. 5-8: Prozessluftsystem Intensivrotte: Schema

Für die Versorgung der Sammeleitungen sind jeweils zentrale Ventilatoren in redundanter Ausführung im Raum über den Tunneln installiert. Die Abb. 5-8 zeigt als schematische Darstellung des Prozessluftsystems, dass die Ventilatoren jeweils unsymmetrisch in der Tunnelreihe platziert sind. Die Abluft der Rottetunnel wird in die Sammeleitungen gesaugt und zur Reinigung geleitet. Die Frischluft wird in der Anlieferungshalle und in der Tunnelfüllhalle angesaugt und in den Sammeleitungen zur Entnahme bereitgestellt. Das weitere Luftmanagement an der Anlage (weitere Absaugung in Tunnelfüllhalle, Absaugung in der physikalischen Aufbereitung) ist für den Rotteprozess irrelevant und wird nicht weiter beschrieben.

Für die Prozessüberwachung steht nach Abb. 5-4 eine begrenzte Zahl von messtechnischen Einrichtungen zur Verfügung. Die Temperatur im Haufwerk wird durch drei Stecherthermometer (kurz: Stecher) erfasst. Diese werden nach der Füllung des Reaktors über Öffnungen in der Tunneldecke von außen in das Haufwerk eingesteckt. In der Zuluftleitung werden Temperatur sowie Druck und in der Abluftleitung Temperatur sowie Sauerstoffkonzentration gemessen. Aufgenommen werden zudem die Leistung des Tunnelventilators, der Öffnungsgrad der drei Jalousieklappen sowie die eingesetzte Menge an Prozess- oder Brauchwasser. Die aufgeführten Größen werden als Stundenmittelwert erfasst und entsprechend der Pro-

zesszeit im Prozessleitsystem verarbeitet und zum Abruf sowie der manuellen Auswertung gespeichert.

Nach der biologischen Behandlung im Rottetunnel wird das Rottegut ausgetragen. Die Leerung erfolgt mittels einer Austragsmaschine (siehe Abb. 5-2, Nr. 4), welche auf Schienen über einem Transportband (Nr. 5) geführt ist. Die Bänder sind auf dem Hallenboden montiert und von der Laufrichtung reversierbar. Die Anordnung steht an beiden Tunnelreihen zur Verfügung. Die Austragsmaschinen werden vor die Tunnel gefahren und an der Tunnelöffnung fest angekoppelt. Die Leerung erfolgt nach dem Funktionsprinzip von Schubböden. Hierzu liegen auf dem Tunnelboden zwischen den Belüftungsöffnungen 15 Schub- bzw. Zugelemente auf. Diese haben einer Breite von 250 mm, untereinander einen Abstand von 70 mm und reichen über die gesamte Tunnellänge. Die Enden der Elemente ragen auf der Torseite über den eigentlichen Boden des Tunnels hinaus und besitzen runde Aussparungen, die von der Austragsmaschine ergriffen werden können.

Gemäß des Funktionsprinzips werden unter Ausnutzung von Haft- und Gleitreibung zunächst alle Zugelemente durch die Maschine ergriffen und durch einen Hub von max. 250 mm in Richtung der Maschine gezogen, wodurch sich das Haufwerk mit bewegt. Anschließend werden die Elemente einzeln oder in Gruppen nach hinten geschoben, so dass der Transport mit einem weiteren Hub erneut erfolgen kann. Durch die Bewegung des Rottegutes in Richtung Tunnelöffnung kann es von zwei in der Austragsmaschine übereinander versetzt eingebaute Kratzerwellen erfasst und auf das Transportband geworfen werden. Über dieses Bandsystem wird das Material entweder in die Verladung zur Nachrotte verbracht oder einer Eintragsmaschine zugeführt, indem es über ein zweites Steigband (siehe Abb. 5-2, Nr. 6) zum Transportband an der Hallendecke gelangt.

Für den Fortgang der Arbeit ist es notwendig, einheitliche Begriffe der Verfahrensschritte der Rotte und entsprechende Bezeichnungen für das Rottegut zu definieren. Diese sind in der Abb. 5-9 veranschaulicht.



Abb. 5-9: Bezeichnung der Verfahrensschritte der Rotte und des Rottegutes

Das in der physikalischen Aufbereitung erzeugte Rottegut wird in den Rottetunnel eingetragen und Eintragsmaterial (kurz: Eintrag) genannt. Der Behandlungszeitraum bis zur Materialumsetzung ist der erste Rotteschritt. Die Umsetzung bezeichnet den Vorgang, bei dem der Tunnel entleert und das Rottegut in einen anderen Tunnel umgesetzt wird. Das Rottegut für den anderen Tunnel wird Umtrag genannt. Der weitere Rotteschritt kennzeichnet jeweils den Zeitraum nach der Neubeschickung bis zur nächsten Tunnelleerung. Zum Ende der Prozessdauer wird das Material für die Behandlung in der Nachrotte ausgetragen und Austrag genannt. Die Dauer des ersten Rotteschritts betrug laut Anlagen-Betriebsdaten von 2010 in 37 % der Fälle eine Woche, bei 60 % zwei und bei 3 % drei Wochen. Der zweite Rotteschritt dauerte bei 12 % eine Woche, bei 77 % zwei und bei 11 % drei Wochen.

5.2 Randbedingungen

Die Behandlung von Restabfallfraktionen im Festbett zeichnet sich durch eine hohe Komplexität aus, die eine fehlerfreie rein analytische Betrachtung unmöglich macht. Ursachen sind:

- Heterogenität des Stoffsystems
- Beeinflussung der Prozesszustände durch das technische System

Die Problemanalyse in Kapitel 3 (S. 18 ff.) und die Ausführungen zum Stand des Wissens in Kapitel 4 (S. 23 ff.) zeigten die Umstände eindeutig. „Die größere Komplexität der chemischen und mikrobiologischen Vorgänge [gegenüber Kompostierungsanlagen] hat [...] zur Folge, dass sich Kinetik und Dynamik der MBA einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Herleitung entziehen“ [Kaiser & Soye, 2000]. Modelle zur Beschreibung der Vorgänge (Simulationen) geben die Realität nicht wieder, weil eine seriöse Parametrierung der stochastisch stark schwankenden Bedingungen nicht möglich ist. Untersuchungen im Labormaßstab scheiden aufgrund der Zusammensetzung und der Partikelgrößenverteilung im Stoffsystem aus. Für realitätsnahe Ergebnisse und zur Entwicklung verallgemeinerungsfähiger Vorgehensweisen waren experimentelle Untersuchungen an Großanlagen notwendig.

Die Bewertung des Prozessverhaltens erfolgte nicht anhand von mikrobiologischen Parametern, wie sie in der Literatur überwiegend genannt werden. In heterogenen Stoffsystemen erfordert deren Anwendung besondere Anforderungen an die Probenahme und die Stoffaufbereitung vor der Analyse, die an Großanlagen nicht gegeben sind. Solche Detailbetrachtungen sind erst an Systemen lohnenswert, an denen grundlegende Störungen des Rotteprozesses behoben wurden. Die Kenntnis von der Existenz solcher Störungen war jedoch die Motivation zur vorliegenden Arbeit. Die Bewertung des Prozesses sollte anhand der Reaktion des Systems erfolgen, d.h. durch das Betriebsverhalten, welches sich in Messgrößen widerspiegelt.

Untersuchungen an im Betrieb befindlichen großtechnischen Anlagen sind mit entsprechenden Einschränkungen und spezifischen Randbedingungen verbunden, die einen ungestörten Versuchsbetrieb unmöglich machen. Diese Umstände sind im Wesentlichen:

- Einordnung der Untersuchungen in den betrieblichen Ablauf
- Ausschluss weitreichender Umbauten am Rotteaktor und seiner Peripherie
- Unterordnung unter bestimmte Entscheidungen des Anlagenbetreibers
- Ausschluss einer signifikanten Erweiterung der messtechnischen Einrichtungen
- Fehlende Möglichkeiten zur Bilanzierung des Stoff- und Wärmehaushaltes
- Langwierigkeit der Versuche aufgrund langer Rottezeiten
- Beibehaltung der grundlegenden Mechanismen der Prozessregelung

Die Ausgestaltung der Untersuchungen unterliegt durch die baulich-konstruktive Situation, aus ökonomischen Gründen und durch Entscheidungen des Anlagenbetreibers engen Grenzen. Die Untersuchungen dürfen den Betriebsablauf wie die Beschickung und Leerung der Reaktoren nicht stören. Die zu entwickelnde Messtechnik muss den klimatischen Bedingungen im Rottetunnel und im Rest der Anlage standhalten (Temperatur, staub-, wasser- und biologisch belastete Luft).

Eine exakte Bilanzierung ist an der Anlage nicht vorgesehen. Die konstruktive Ausführung des Leitungssystems lässt keine Messungen zur Aufnahme von Strömungsgeschwindigkeiten an systemrelevanten Stellen am Reaktor zu. Ursache sind fehlende Beruhigungsstrecken zur Überschreitung der hydrodynamischen Einlaufänge in den Leitungen mit quadratischem Querschnitt. Ein Vergleich ein- und austretender Ströme ist nur bei einer homogenen Durchströmung des Haufwerks möglich, was in Voruntersuchungen als nicht gegeben ermittelt wurde.

Die Dokumentation zu den Mechanismen der Prozessregelung geht über die Formulierung allgemeiner Zusammenhänge nicht hinaus. Aufgrund der Geheimhaltung des Softwareentwicklers sind die Motivation und Umstände der Programmierung teilweise ungeklärt. Die Zusammenhänge müssen durch schrittweises Annähern mittels erweiterter messtechnischer Begleitung des Rotteprozesses selbst ermittelt werden. Außerdem können nur allgemein zugängliche Parameter angepasst werden.

5.3 Untersuchungsprogramm

Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen orientierte sich an einer für die Ingenieurwissenschaft typischen schematischen Vorgehensweise. Zielstellung war es, die Bedingungen und Vorgänge im Reaktor und in seiner Peripherie aufzudecken und das Betriebsverhalten zu analysieren. Eine Übersicht der Untersuchungen wurde in A.6 (S. 179 ff.) erstellt.

Zunächst wurde der Istzustand bewertet und bei ausreichender Transparenz der Bedingungen und Vorgänge weitere Messmethoden eingesetzt oder Modifizierungen an der Anlage vorgenommen. Theoretisch machen die Umstände (Stoffsystem, Technik, Betrieb) bei jeder Modifizierung Untersuchungen eines ganzen Jahresganges notwendig. Dies ist praktisch unmöglich, so dass die Versuchsanzahl auf das Mindestmaß reduziert wurde. Das Untersuchungsprogramm zeigte im Wesentlichen folgenden Aufbau:

- Auswertung von Betriebsdaten des Prozessleitsystems der Anlage
- Untersuchung von Durchströmbarkeit und Setzungsverhalten von Rottegutchargen
- Messung der örtlichen Temperatur und Gaszusammensetzung im Rotteguthaufwerk
- Analyse des Luftmanagements durch Druckmessungen

Die experimentellen Untersuchungen starteten in 07/2010. Parallel erfolgte eine Auswertung der Anlagenbetriebsdaten für den Zeitraum 01.01.10 bis zum Startzeitpunkt 22.07.10. Für alle Abfallchargen wurden Kriterien erstellt und Niveau und Verlauf der Messdaten entsprechend eingeordnet. Dadurch sollte die Methode einer Betriebsdatenauswertung auf ihre Eignung zur Beurteilung des Prozesses bewertet werden. Außerdem wurden der Zustand und ein möglicher Optimierungsbedarf der MBA-Anlage bereits anhand vorliegender Daten gezeigt und erste Erkenntnisse vom Regelungsmechanismus gewonnen. Weniger umfangreiche Betrachtungen erfolgten darüber hinaus für Daten aus dem Jahr 2009 für denselben Zeitraum. Für detaillierte Informationen waren experimentelle Arbeiten unumgänglich. Aufgrund der Vielzahl an Messreihen sind nicht alle Ergebnisse in der Arbeit dargestellt.

Als geeignete Messgrößen wurden die Temperatur und die Gaszusammensetzung im Haufwerk ausgewählt. Es musste geeignete Messtechnik entwickelt und gebaut werden, weil die an der Anlage operativ eingesetzte Technik für eine Prozessüberwachung im Rahmen der Zielstellung unzureichend war. Die Messtechnik wurde für den Wiedereinsatz geplant und musste den Bedingungen in der Intensivrotte standhalten sowie flexibel einsetzbar sein, um Messungen an jedem Tunnel der Anlage durchführen zu können. Durch den Einsatz von Messsonden wurden zunächst kontinuierliche Temperaturmessungen an mehreren ausgewählten Stellen im Haufwerk durchgeführt (Zeitraum 21.07.10 bis 16.02.11, Übersicht der Untersuchungen siehe Tab. A-7 im Anhang). Neben einer Darstellung des Istzustandes wurden auch die Effekte von Modifizierungen am Tunnel untersucht. Um die Reaktion der Messgrößen auf Veränderungen der Prozessregelung in Verbindung zu setzen, erfolgte stets eine Gegenüberstellung der Messwerte mit den Betriebsdaten der untersuchten Rottetunnel. Die Untersuchungen sind ausführlich in der Diplomarbeit [Wanka, 2011] beschrieben.

Das Rottegut der untersuchten Tunnel wurde größtenteils parallel mit Hilfe einer Durchströmsäule auf Durchströmrbarkeit und Setzungsverhalten untersucht (Übersicht siehe Tab. A-8 und Tab. A-9). Mit dieser Messtechnik sollten neben der Charakterisierung des Stoffsystems auch Zusammenhänge zum ermittelten Prozesszustand erklärt werden. Des Weiteren erfolgten qualitative Versuche zum Wasserhaushalt des Rottegutes. Die Untersuchungen zum Rottegut sind ausführlich in der Diplomarbeit [Mu, 2011] beschrieben.

Kurz vor Ende der genannten Untersuchungen starteten Messungen zur Drucksituation im Prozessluftsystem der Anlage (02.02.11 bis 23.05.11, Übersicht siehe Tab. A-11). Dadurch sollten Strömungsverhältnisse im Luftsystem sowie Wechselwirkungen und unbeabsichtigte Beeinflussungen der Rottetunnel aufgedeckt werden. Hierfür musste geeignete Messtechnik entwickelt werden. Die Untersuchungen sind ausführlich in der Diplomarbeit [Umbach, 2011] beschrieben.

Es schlossen sich Messreihen mit einer zusätzlichen kontinuierlichen Gasanalyse im Haufwerk an (29.11.11 bis 03.07.12, Übersicht siehe Tab. A-10). Eingesetzt wurden die erwähnten Messsonden. Das Messsystem musste jedoch durch entwickelte periphere Komponenten deutlich erweitert werden. Neben einer Darstellung des Istzustandes wurden auch die Wirkungen von Modifizierungen am Rottetunnel untersucht. Die Untersuchungen sind ausführlich in der Diplomarbeit [Saczinski, 2012] und vorbereitende Arbeiten in der Projektarbeit [Jahn, 2011] beschrieben.

Parallel hierzu erfolgten Versuchsreihen zur Druckmessung an zwei parallel liegenden Rottetunneln (30.11.11 bis 03.07.12, Übersicht siehe Tab. A-12).

Vereinzelt werden Untersuchungen an einer weiteren MBA-Anlage (Anlage B genannt) aufgeführt. Diese fanden im Zeitraum 16.07.14 bis 07.11.14 statt und hatten ebenso die Optimierung der Intensivrotte als Zielstellung. Bei der Anlage handelt es sich um den gleichen Typ wie die in 5.1 (S. 49 ff.) ausführlich beschriebene Anlage (im Folgenden Anlage A genannt), jedoch mit einer Anzahl an Rottetunneln von 44.

5.4 Messmethoden und Messtechnik

5.4.1 Durchströbarkeit und Setzungsverhalten

Konzeption

Die Durchströbarkeit und das Setzungsverhalten wurden als Hilfsgrößen genutzt, um die Bedingungen im Haufwerk anhand von physikalischen Größen zu beschreiben. Sie beeinflussen den Wärme- und Wasserhaushalt, die Sauerstoffversorgung und sind die Voraussetzung zur Steuerung des Rotteprozesses. Für die Untersuchung wurde eine am Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik speziell für solche Zwecke entwickelte Durchströmsäule eingesetzt. Die Abb. 5-10 (oben) zeigt deren Aufbau. Die für den Betrieb benötigte Technik (farbig dargestellt) wurde angepasst und kompakt in einer Einhausung angeordnet, deren Aufbau die Abb. 5-10 (unten) zeigt.

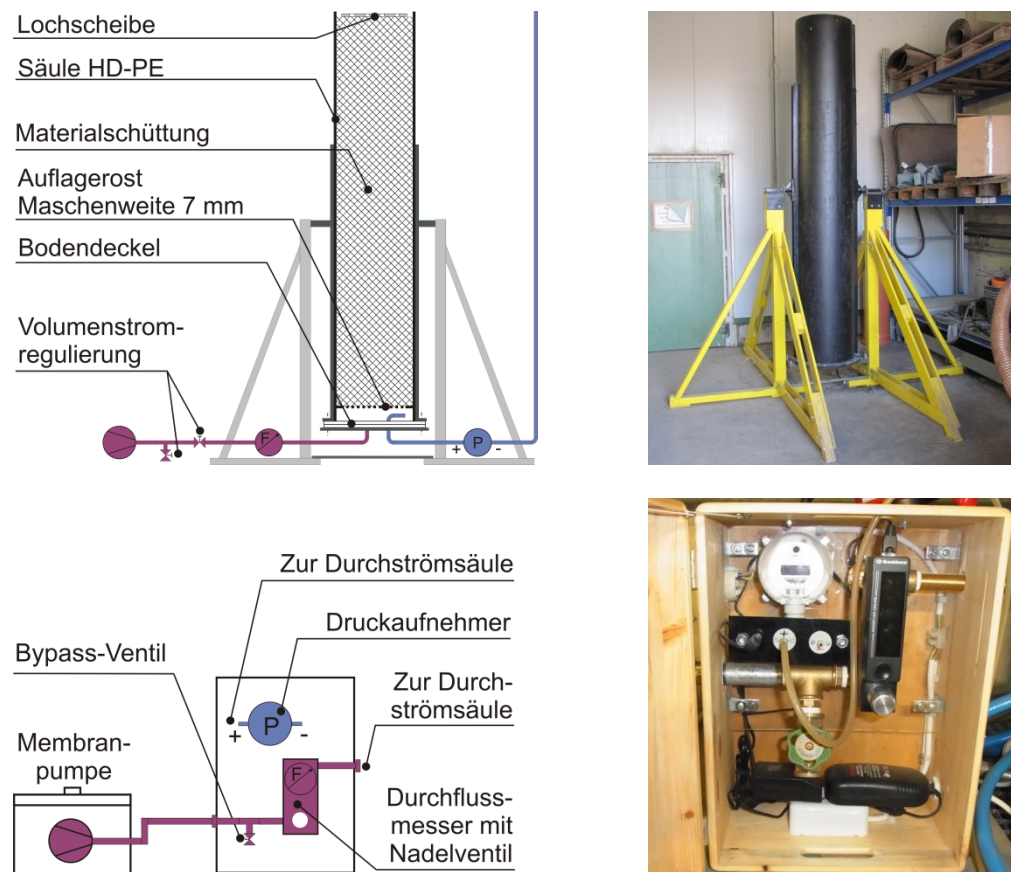


Abb. 5-10: Durchströmsäule (oben) und benötigte Technik (unten)

Bei der Durchströmsäule handelt es sich um ein HD-PE-Rohr mit einem Durchmesser DN 500 und einer Länge von 3 m. Mit dieser Höhe lassen sich die in der Realität existierenden Schütthöhen abbilden. Der Durchmesser gewährleistet realitätsnahe Untersuchungen für Stoffsysteme mit Teilchengrößen bis 50 mm. Im Inneren befindet sich im Abstand von 10 cm zum Boden ein Auflagerost für die Schüttung. Am Bodendeckel werden Stutzen durch Schläuche mit der für den Betrieb benötigten Technik verbunden. Eine Membranpumpe dient hierbei der Luftversorgung. Die Spezifikation aller Geräte ist in der Tab. A-1 (S. 173) zusammengetragen. Der Volumenstrom wird grob mittels eines Bypass-Ventils eingestellt und

die Feinjustierung mit dem Nadelventil eines elektronischen Durchflussmessers vorgenommen. Die Luft wird am Fuß des Apparates eingeblasen und mittels eines Druckaufnehmers der entstehende Überdruck unter dem Material ermittelt. Dieser stellt als Differenzdruck zur Umgebung einen Druckverlust bei Durchströmung dar. Weil die Messungen manuell ausgeführt werden müssen, wurde auf eine elektronische Registrierung der Messwerte verzichtet.

Bei durchströmten Schüttungen muss die Randgängigkeit beachtet werden. Diesem Effekt musste Rechnung getragen werden, da die Durchströmsäule für die Ermittlung von stoffsystemspezifischen Parametern genutzt wurde. Konstruktiv liegt das Verhältnis von Säulendurchmesser zu maximalem Teilchendurchmesser bei mindestens 10:1. Ein größerer Durchmesser wäre noch vorteilhafter, jedoch nicht mehr handhabbar. Um Störungen bei der Ausbildung der Schüttung zu verhindern, wurden bei dem zu untersuchendem Material besonders große und untypische längliche Teile entfernt. Die Innenseite der Säule weist einen geringen Gleitwiderstand auf, so dass die Materialsetzung von den Schubspannungen zwischen Material und Wand wenig beeinflusst wird und gleichmäßig über dem Querschnitt erfolgen kann. Die Wandbereiche sind von einer direkten Durchströmung ausgeschlossen, weil der Auflagerost am Rand in einer Breite von etwa 70 mm keine Öffnungen besitzt. Örtliche Messungen der Gaszusammensetzung (Rand/Kern) wurden zur qualitativen Kontrolle auf Randgängigkeit herangezogen, wobei sich keine Auffälligkeiten zeigten. Die Säule wurde nur während der Messwertaufnahme durchströmt, welche nur wenige Minuten dauerte, so dass eine Austrocknung und damit Eigenschaftsänderung nicht auftritt. Stoffsystemverändernde anaerobe Zustände im Untersuchungsmaterial wurden dadurch vermieden, dass die Messungen und die damit verbundene Belüftung in regelmäßigen Abständen durchgeführt wurden.

Versuchsdurchführung

Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse ist eine repräsentative Probe, die dem laufenden Betrieb entstammt. Das Material wurde in der Tunnelfüllhalle über eine Ausschleusung an den Transportbändern der Beschickung (unter der Hallendecke) entnommen, indem dieses direkt in darunter stehende 240 l-Müllgroßbehälter abgeworfen wurde. Das Stoffsystem wurde zur Säule transportiert, ausgekippt und manuell homogenisiert, um eine Separierung durch den Materialtransport rückgängig zu machen. Das Material wurde mittels 20 l-Eimern in die Säule gefüllt und parallel jeweils die Masse bestimmt. Bei der Befüllung wurde auf eine Reproduzierbarkeit geachtet, indem die Eimer den gleichen Füllgrad besaßen und der Vorgang ähnlich (Dauer, Geschwindigkeit) realisiert wurde. Mittels der Anfangsschütthöhe in der Säule konnte die Anfangsschüttdichte des Materials berechnet werden.

Von dem homogenisierten Material wurden verteilt drei Proben entnommen, um hieraus den gravimetrischen Wassergehalt mittels der Dörr-Wäge-Methode¹⁴ zu bestimmen. Wie bei Stoffen mit biogenem Anteil üblich, wird die Wassermenge auf die Gesamtmasse bezogen (m_W/m_{ges}). Bei der Bestimmung des Wassergehaltes wurde darauf geachtet, schwere nicht saugfähige Komponenten aus der Probe zu entfernen. Hierdurch ist gewährleistet, dass sich

¹⁴ vgl. Durchführung nach DIN 18121-1: Wassergehalt: Bestimmung durch Ofentrocknung. Die Probe wird in einem Trocknungssofen bei 105 °C getrocknet und die Massenabnahme bestimmt.

der ermittelte Wert nur auf die relevanten Fraktionen, d.h. die organischen Komponenten, bezieht. Nur der Wassergehalt im saugfähigen Anteil ist eine prozessrelevante Größe.

Direkt nach der Befüllung und in zeitlichen Abständen danach wurden die Setzung und der Druckverlust ermittelt. Zur Bestimmung der Setzung wurde auf der Schüttung eine leichte grobgebohrte Holzplatte gelegt und von dort aus jeweils bis zur Oberkante der Säule gemessen. Der Druckverlust wird bei Durchströmung mit verschiedenen Volumenströmen aufgenommen. Vor der ersten Messung einer Messreihe erfolgte für eine Wartezeit von 10 min ein Betrieb mit vollem Volumenstrom, um eine Ausrichtung eventuell in Makroporen lose liegender Partikel sicherzustellen. Anschließend wird der Luftvolumenstrom schrittweise von Null auf den höchsten Wert angehoben und anschließend wieder gesenkt. Die Werte unterscheiden sich nur unwesentlich, wurden aber zur Kontrolle dennoch aufgenommen.

Zur Übertragbarkeit an Schüttungen anderer Anströmflächen wird der Volumenstrom auf den freien Querschnitt der Versuchssäule bezogen und somit als Leerrohrgeschwindigkeit beschrieben. Die Leerrohrgeschwindigkeit wurde mit maximal 51,5 m/h ($Re_{\text{Leerrohr}} \approx 470$) so gewählt, dass laminare Bedingungen auch im Haufwerk vorliegen. In diesem Fall ist der Zusammenhang zwischen Druckverlust und Leerrohrgeschwindigkeit linear, wodurch sich die Auswertung der Untersuchungen vereinfacht.

Am Versuchsende werden die Schläuche zur peripheren Technik getrennt und die Säule über einen Flaschenzug zur Leerung im Gestell gekippt. Nach dem Materialauswurf erfolgte eine Überprüfung und ggf. Beseitigung der Verschmutzung des Auflagerostes.

Versuchsauswertung

In der Abb. 5-11 ist der Druckverlust in Abhängigkeit der Leerrohrgeschwindigkeit beispielhaft für einen Versuch dargestellt. Es zeigt sich der lineare Zusammenhang zwischen beiden Größen. Der Anstieg der Gerade stellt als charakteristische Größe den Durchströmwiderstand R_{ges} [Pa·s/m] der Schüttung zu einem bestimmten Zeitpunkt der Versuchsdauer dar. Der Durchströmwiderstand kann aus den Messwerten mittels linearer Regression ermittelt und über der Versuchsdauer aufgetragen werden. Die Abb. 5-12 zeigt dies beispielhaft. Mit einer Versuchsdauer von mindestens sieben Tagen in den Hauptversuchen wird die übliche Dauer von Rotteschritten abgebildet.

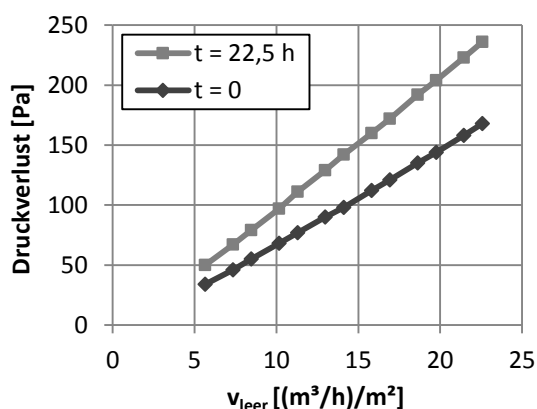


Abb. 5-11: Druckverlust über der Leerrohrgeschwindigkeit zu zwei Zeitpunkten (DS 5)

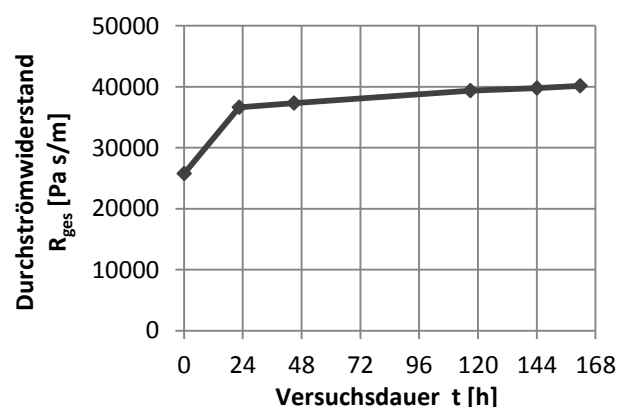


Abb. 5-12: Durchströmwiderstand über der Versuchsdauer (DS 5)

Der Durchströmwiderstand R_{ges} ist von der Schütthöhe (d.h. dem Strömungsweg) abhängig. In Versuchen wurden für fünf Schütthöhen jeweils Messwerte direkt nach der Befüllung und zu drei weiteren Zeiten aufgenommen. Die Abb. 5-13 zeigt das Ergebnis aus einem Versuch. Die absoluten Unterschiede beim R_{ges} zwischen verschiedenen Zeiten werden umso größer, je größer die Schütthöhe ist. In Wirklichkeit ist der untersuchte Zeitraum zum Erreichen eines stationären Zustandes nicht ausreichend (vgl. Abb. 5-12), so dass die Unterschiede noch stärker ausfallen werden. Der Durchströmwiderstand erhöht sich mit zunehmender Schütthöhe linear. Einzig der erste Wert weist hierzu eine Abweichung auf und liegt höher. Eine mögliche Ursache kann die stärkere Verdichtung der Schüttung durch den Materialeinfall in die Säule bei niedrigen Schütthöhen sein. Die Fallhöhe ist größer, so dass es zu einer stärkeren Kompression kommt, deren Intensität allein durch natürliche statische Effekte (Setzung) nicht erreicht werden würde. Die Bedingungen spiegeln die Realität wider, weil dort derartige Fallhöhen vorliegen. Weil eine große Schütthöhe auch bei guter Durchströmbarkeit ein zuverlässiges Drucksignal (Größenordnung liegt höher) und aussagekräftige Vergleiche verschiedener Materialchargen gewährleistet, wurde in den Hauptversuchen mit 290 cm eine Schütthöhe gewählt, die größer als in den untersuchten Reaktoren war.

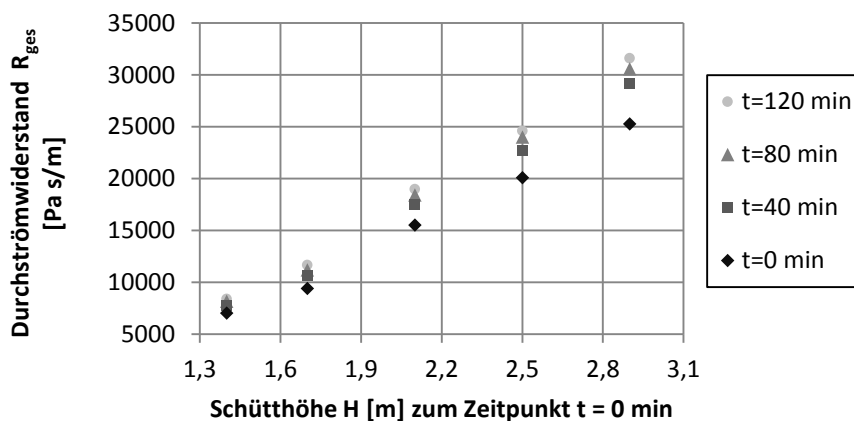


Abb. 5-13: Durchströmwiderstand in Abhängigkeit der Anfangsschütthöhe (DS 13)

Um R_{ges} universell auf Schüttungen übertragbar zu machen, wird die Größe mit der jeweiligen Schütthöhe normiert und hieraus der spezifische Durchströmwiderstand R_L gemäß

$$R_L(t) = \frac{R_{ges}(t)}{H(t)} \quad (5-1)$$

mit der Einheit $[(\text{Pa}\cdot\text{s})/\text{m}^2]$ angegeben. Diese Größe kann zu beliebigen Zeitpunkten ermittelt und wie der Durchströmwiderstand über der Versuchsdauer aufgetragen werden.

Der vermutete Zusammenhang zwischen der höhenabhängigen Verdichtung und dem Widerstand lässt eine Konstanz des spezifischen Durchströmwiderstandes über der Höhe wahrscheinlich sein. Eine Bestätigung dieser Annahme kann nur experimentell durch in der Schüttung verteilte Druckaufnehmer zur Berechnung des Druckverlustes erfolgen. Dies wurde nicht durchgeführt. Literaturangaben (vgl. 4.1.1, S. 23 ff.) zeigen eine Linearität des Druckverlustes mit der Höhe, aber teilweise auch hiervon abweichende Verläufe. Sollten Abweichungen vorliegen, handelt es sich um systematische Effekte, die bei einem Vergleich von Messergebnissen verschiedener Versuchsreihen untereinander irrelevant sind.

5.4.2 Örtliche Temperatur und Gaszusammensetzung

Konzeption Messsonde

Zur Beschreibung des Betriebsverhaltens der Rotterektoren sind eine stete Messwertaufnahme und eine erhöhte Anzahl an Messstellen im Haufwerk notwendig. Wichtige Messgrößen sind die örtliche Temperatur und die örtliche Gaszusammensetzung. Die Messgrößen beschreiben zusammen die örtliche Durchströmung, den Wärmehaushalt und Rückwirkungen in der Prozessführung, die aufgrund der hohen Wärmekapazität des Rottegutes durch die Temperatur allein nicht sichtbar werden.

Die bautechnischen Gegebenheiten und die klimatischen Bedingungen im Inneren des Rottetunnels mussten bei der Konzeption berücksichtigt werden. Aufgrund des Stahlbetonbaus der Reaktoren sind Sensoren mit Signalübertragung durch Funk nicht einsetzbar. Die Messsignale müssen per Kabel nach außen geleitet werden. Als einzige Zugangsmöglichkeit zum Reaktorraum stehen die drei Öffnungen der Stecherthermometer an der Tunneldecke (KG-Rohr DN150) zur Verfügung. Die Abb. 5-14 zeigt die technische Realisierung der konzipierten Messsonde.

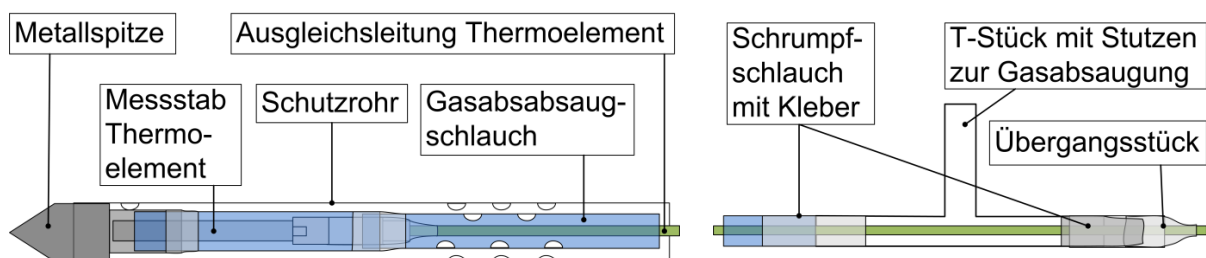


Abb. 5-14: Messsonde Unterteil (links) und Oberteil (rechts)

Zur Temperaturmessung wurden NiCr-Ni-Thermoelemente (Typ K) eingesetzt. Diese erlauben eine den Anforderungen genügend hohe Genauigkeit und wurden zum Schutz in PA-Schläuche eingebaut. Bei den Thermoelementen ist der Übergang vom metallischen Messstab zur Ausgleichsleitung in Form einer Hülse vom Durchmesser größer als die übrigen Bereiche ausgeführt. Auf der Kabelseite der Elemente wurde ein 8x6-Schlauch bis zum Anschlag an die Hülse aufgesteckt. Auf der anderen Seite wurde ein 10x8-Schlauchstück aufgeschoben. Das Verschließen des Übergangs erfolgte jeweils mittels Schrumpfschlauch und bei der Schlauchöffnung auf der Messstabseite durch eine Schrumpfkappe.

Die technische Realisierung gewährleistet eine Luft- und Wasserdichtheit für den Metallstab. Außerdem besteht die Möglichkeit einer Gasanalyse, weshalb am unteren Ende über dem Element Löcher zur Gasabsaugung im Schlauch enthalten sind. Um diese Funktion zu nutzen, musste am Ende des Schlauches (Oberteil) wieder eine Trennung desselben vom Kabel erfolgen (siehe Abb. 5-14 rechts). Dazu wurde ein T-Stück auf den Schlauch aufgesetzt. In Längsrichtung wurde das Kabel ausgeführt und das Ende durch Schrumpfschlauch und selbstvulkanisierendes Band abgedichtet. Der Abzweig des T-Stücks dient der Absaugung des im Schlauch bzw. örtlich im Haufwerk befindlichen Gases.

Die Schlauchlänge beträgt 10 m und berücksichtigt die gewünschten Positionen der Messstellen im Rotterektor und die notwendige Absaugung durch den Gasanalysator. Um die

Sonde in das Haufwerk einbringen zu können, wurde der Schlauch in den unteren 2 m in einem Schutzrohr verbaut, welches am unteren Ende durch Einschlagen einer Metallspitze verschlossen wurde. Am anderen Ende wurde ein Knickschutz mit einer gasdichten Abdichtung angebracht. Für das Schutzrohr wurde ein Hart-PVC-Rohr (Aqua Plus 20x2,3 mm, wärmebeständig bis 90 °C) genutzt, welches robust ist und ausreichende Stabilität bei hohen Temperaturen bietet. Der Einsatz von Kunststoff war notwendig, um eine ergebnisverfälschende vertikale Wärmeleitung auszuschließen.

Es wurden zwei Sätze mit jeweils zwölf Messsonden gebaut, um zwei Rottereaktoren parallel untersuchen und damit eine größere Anzahl an Versuchsreihen aufnehmen zu können. Die Anzahl an Sonden stellte einen Kompromiss zwischen einem gewünschten engen Messraster zur Prozessverfolgung und der Handhabbarkeit dar. Die Oberteile von drei oder sechs Sonden wurden in Paneelen zusammengefasst, welche an den Öffnungen der Stecherthermometer auf der Tunneldecke montiert wurden. Die Abb. 5-15 zeigt die Paneele im montierten Zustand mit Nr. 1.

Konzeption Peripherie zur Messsonde

An die Ausgleichsleitung des Thermoelements wird eine Verlängerung angeschlossen, welche zu einem Datenlogger mit 12 Eingängen führt. Der Datenlogger war entweder ein extern stehendes Gerät, wie es die Abb. 5-15 mit Nr. 2 zeigt, oder verbaut im Messsystem zur kontinuierlichen Gasanalyse, wie in der Abb. 5-17 zu sehen.

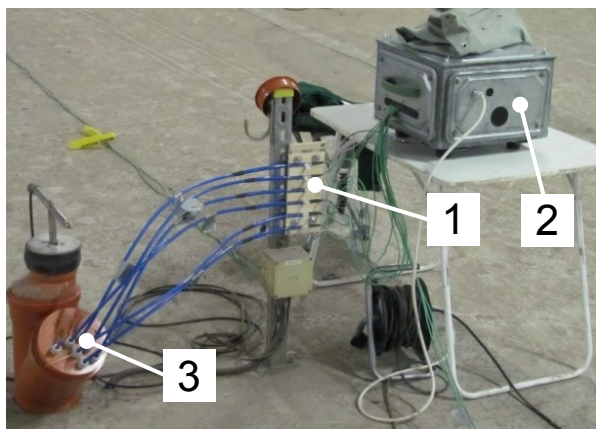


Abb. 5-15: Ausleitung der Sonden aus dem Tunnel und Temperaturdatenlogger

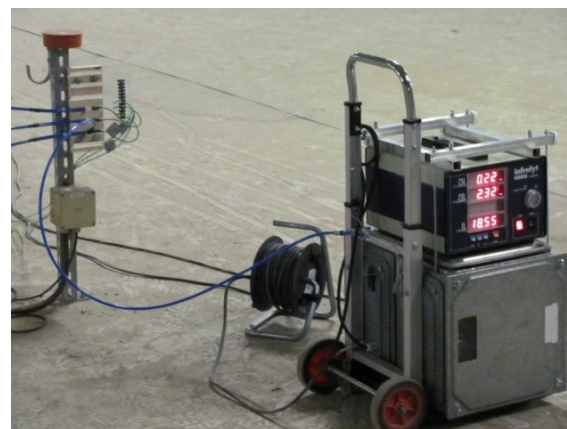


Abb. 5-16: Messwagen zur manuell durchgeführten Gasanalyse

Die Gasanalyse erfolgte im Anfangsstadium der Untersuchungen manuell durch schrittweisen Anschluss eines Messwagens an die Oberteile (T-Stücke) der Sonden. Die Abb. 5-16 zeigt diese Variante der Messwertaufnahme. Der Messwagen wurde als zweifache Ausführung gebaut und integrierte einen Gaskühler und den nachgeschalteten Gasanalysator. Die Variante begrenzte die Anzahl an Messdaten stark. Um Analysen kontinuierlich und bei Abwesenheit durchführen zu können, war in einem weiteren Stadium die Entwicklung eines umfangreichen Messsystems erforderlich. Aufgrund der Bedingungen (Temperatur, Aggressivität der Medien, Feuchte, Staub) musste es eine entsprechende Robustheit aufweisen. Derartige Systeme sind am Markt nicht verfügbar. Der Aufbau und die Funktion werden anhand der Abb. 5-17 erläutert.

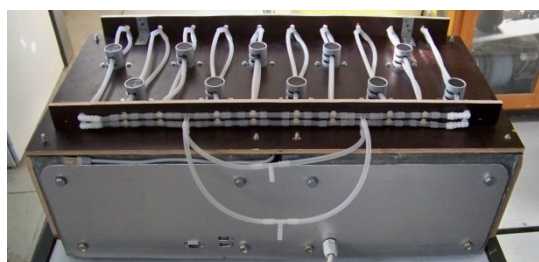
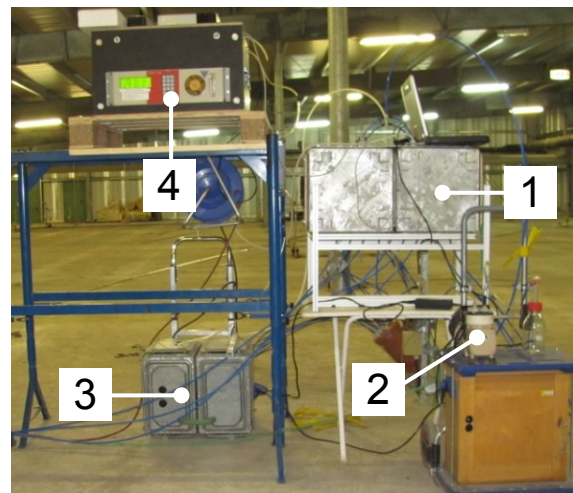
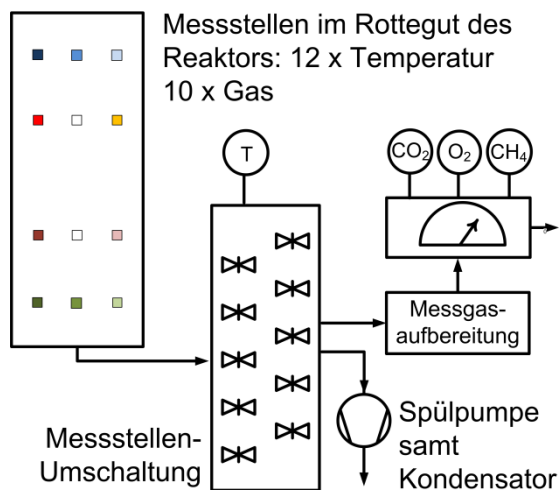


Abb. 5-17: Messsystem Gasanalyse und Temperatur (oben: Schema und Messanordnung auf der Tunneldecke, unten: Umschaltsystem und Gasanalysator)

Aus Kosten/Nutzen-Gründen wurden nur zehn Messstellen zur Gasanalyse vorgesehen. Weil die Analyse beim Einsatz eines Analysators nicht parallel für verschiedene Messstellen, sondern nur durch schrittweise Ansteuerung nacheinander erfolgen kann, würde eine größere Anzahl an Schnittstellen die Zykluszeit entsprechend erhöhen. Zur Umschaltung wurde ein rechnergesteuertes Umschaltsystem (Nr. 1 in der Abb. 5-17) mit zehn totraumfreien 3-Wege-Quetschventilen entwickelt. Nur derartige Ventile erlauben unter den gasseitigen Bedingungen eine lange Funktionstüchtigkeit. Die am Umschaltsystem ankommenden zehn Leitungen werden jeweils in einen Spül- und einen Messstrang aufgeteilt. Der Spülstrang besitzt eine Spülpumpe (Nr. 2), die für einen steten Gastransport sorgt und hierdurch die aus der großen Leitungslänge zwischen Messstelle und Umschaltsystem resultierende lange Ansaugzeit bei der Analyse reduziert. Das Ergebnis steht schneller zur Verfügung. Wird eine Messstelle vom Rechner geschaltet, gelangt das Gas am Quetschventil in den Messstrang und durchläuft zunächst eine Messgasaufbereitung (Nr. 3). Diese besteht aus einem Gaskühler zur Wasserabscheidung und einer Trockensäule als Sicherungseinrichtung gegen mitgezogenes Kondensat. Das feuchtegesättigte Gas kondensiert teilweise in den Leitungen und könnte sonst zum Fluten der Technik führen. Am Ende des Messstrangs gelangt das Gas zum Gasanalysator (Nr. 4) zur Bestimmung der Konzentrationen von CO₂, O₂ und CH₄. Aufgrund der Bedingungen auf der Tunneldecke musste der Gasanalysator eingehaust und mittels Peltierkühlern auf den zulässigen Betriebstemperaturbereich klimatisiert werden.

Auf den Rechner im Messstellen-Umschaltsystem kann über eine Remotedesktopverbindung zugegriffen werden. Zur Steuerung der Abläufe wurde ein Programm auf der Basis von Microsoft Visual Studio entwickelt. Die Abb. A-1 (S. 173) zeigt die Benutzeroberfläche. Die

ermittelte Gaszusammensetzung wird vom Rechner erfasst und auf einer eigens angepassten Datenbank abgespeichert, deren Verwaltungssystem MySQL ist.

Versuchsdurchführung

Für die Versuche mussten geeignete Messstellen festgelegt werden. In Untersuchungen durch die TU Dresden im Vorfeld der Arbeit (manuelle Gasanalyse im Haufwerk an den Wänden und 0,4 m davon entfernt) wurde eine Randgängigkeit im Reaktor festgestellt. Weitere Messungen waren deshalb in diesen Bereichen nicht notwendig, sondern mussten in den nicht direkt beeinflussten Bereichen erfolgen. Die Abb. 5-18 zeigt die festgelegten Messstellen. Die Positionen befinden sich über der Reaktorlänge in vier Messebenen, welche zur Darstellung ein bestimmtes Farbschema aufweisen. In jeder der vier Messebenen liegen drei Messstellen über der Reaktorbreite, wobei eine Abstufung von dunkel auf der linken Seite (vom Tunneltor gesehen) zu hell rechts erfolgt. Alle Diagramme in der Arbeit zur Temperatur und Gaszusammensetzung an diesen Stellen weisen diese Farbgebung auf.

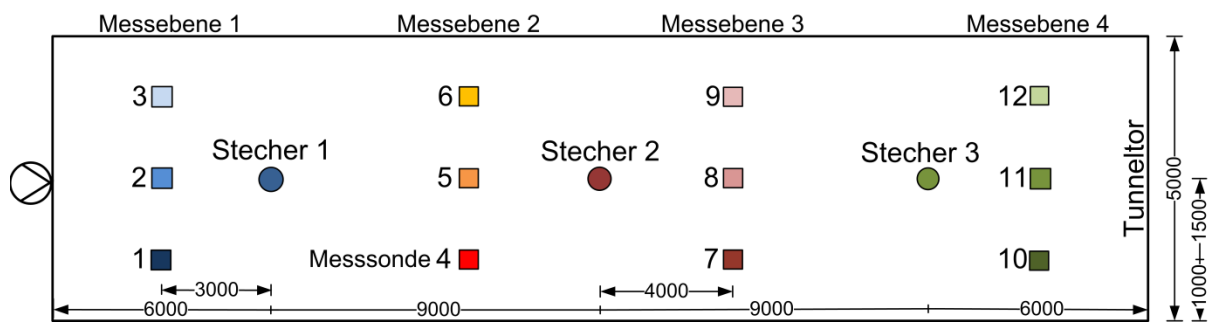


Abb. 5-18: Messstellen im Rottetunnel der MBA-Anlage (Draufsicht, nicht maßstabsgerecht)

Die Nutzung von Messebenen und nur einer Höhenposition begründet sich aus der Art der Reaktorbeschickung. Das Rottegut wird von der Ventilatorseite beginnend in Richtung Tunneltor eingetragen, weshalb mit den Messungen verschiedene Chargen untersucht werden können. Die vier Messebenen befinden sich vor und hinter den drei Stecherthermometern. In Querrichtung liegen die äußeren Stellen 1 m von den Wänden entfernt. Von der Höhe wurden die Messsonden so im Haufwerk positioniert, dass die Spitzen etwa 1 m über dem Belüftungsboden lagen. Die Schütthöhe im Rottetunnel betrug etwa 2,30 m. Die Abweichung von der Mitte begründet sich aus der Materialsetzung, welche in größeren Höhen absolut stärker ausfällt und sich somit das Verhältnis untere/obere Hälfte bei einer höheren Platzierung ungünstig verschieben würde.

Vor jedem Einbau in den Reaktor wurde ein Funktionstest der Sonden durchgeführt, um die Temperaturgleichheit und einen möglichen Verschluss der Gasabsaugöffnungen zu überprüfen. Anschließend wurden die Sonden über die Deckenöffnungen der Stecherthermometer von außen in den Tunnel eingelassen (jeweils drei an Stecher 1 und 3, sechs an Stecher 2). Um den Einbau der Stecher nicht zu stören, erfolgte dies über einen extra installierten KG-Rohr-Abzweig (siehe Abb. 5-15, Nr. 3). Anschließend wurde das Innere des Tunnels betreten und an den Positionen im Haufwerk durch eine Lanze ein dünnes Loch vorgestochen, worin die Sonde eingesteckt wurde. Nach Ende des Rotteschritts wurden die Sonden durch Betreten des Tunnels wieder aus dem Haufwerk gezogen.

Die Datenaufnahme der Temperatur erfolgte vollautomatisch mit dem Datenlogger in einem Messintervall von 10 min. Ein geringeres Intervall war aufgrund der hohen Wärmekapazität und der damit verbundenen Trägheit des Temperaturfeldes im Haufwerk nicht notwendig. Die Trägheit der Temperaturmesssonden kann für die Aufgabenstellung als hinreichend gering eingeschätzt werden.

Für die Gasanalyse wurde der Abzweig am T-Stück der jeweiligen Sonde durch einen PA-Schlauch mit dem Messwagen bei manueller Bestimmung oder mit der entsprechenden Stelle des Umschaltsystems bei automatischem Betrieb verbunden. Die Analyse im Automatikmodus erfolgte durch eine nacheinander folgende Ansteuerung quasi-kontinuierlich. Ein Durchlauf aller Messstellen dauerte etwa 19 min und endete mit der Umschaltung des Messgerätes auf Spülgas. Die anschließende Wartezeit wurde auf 26 min festgelegt, so dass der neue Messzyklus nach 45 min wieder startete. Die Dauer der Wartezeit hat sich als praktikabel erwiesen, weil das Messgerät währenddessen Umgebungsluft (Spülgas) ansaugte und das Mitreißen von Flüssigkeit verhindert werden konnte. Außerdem wurde die Zeit benötigt, um das im Gaskühler des Messstrangs angefallene Kondensat abzuleiten.

5.4.3 Differenzdruck

Konzeption

An den Rotterektoren der MBA-Anlage ist eine Messung von Gasvolumenströmen nicht vorgesehen und eine Nachrüstung an relevanten Stellen wegen fehlender Beruhigungsstrecken nicht möglich. Dadurch besteht eine geringe Transparenz bzgl. der Bedingungen im Luftsystem. Zur Verbesserung wurde die Installation von Differenzdrucksensoren im Rottetunnel und im Prozessluftsystem der Anlage festgelegt. Anhand der Größenordnung und durch den Vergleich verschiedener Messstellen in absoluten Werten oder als Differenz sollten die Funktion des Luftsystems beschrieben und Aussagen zu Strömungsrichtungen und Prozessbedingungen ermöglicht werden. Die Abb. 5-19 zeigt das Messsystem.

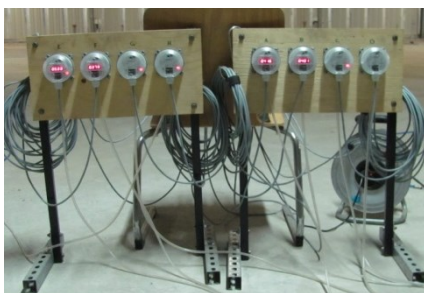


Abb. 5-19: Messanordnung Differenzdruck (links: Paneele, rechts: Steuereinheit auf der Tunneldecke angeordnet)

Das Messsystem bestand aus zwei Paneelen mit jeweils vier Differenzdrucksensoren, welche für die Messungen auf den Tunneldecken aufgestellt wurden. Die Sensoren wurden über PA-Schläuche mit den Messstellen am Rottetunnel oder den Luftleitungen verbunden und gaben den Differenzdruck zur Umgebung an. Jeder Sensor war mit dem Eingang einer Steuereinheit gekoppelt, um das Messsignal umformen, speichern und auslesen zu können.

Versuchsdurchführung

Vor dem Start der Messreihen wurden die Drucksensoren bzgl. des Nullpunktes kontrolliert. Bei den Messungen wurde ein Nullpunktabgleich durchgeführt, indem die Abweichungen zum Nullwert vor und nach der Messung notiert und die Messwerte im Anschluss entsprechend korrigiert wurden. Die Messwertaufnahme erfolgte in einem Intervall von 1 min. Diese kleine Abtastrate war notwendig, um die stochastisch verteilten Einflüsse aufzudecken und Ursachen gegenseitiger Beeinflussungen aufnehmen zu können.

In den Untersuchungen kamen zwei Varianten der Druckaufnahme zur Anwendung. Durch Messungen an Einzeltunneln sollte das Verhalten einzelner Reaktoren und auch eine Druckdifferenz über dem Haufwerk aufgenommen werden. Außerdem ermöglichte ein Vergleich der an verschiedenen Tunneln ermittelten Messwerte Aussagen zu den Drucksituationen in Abhängigkeit der Lage der Reaktoren im Prozessluftsystem der Gesamtanlage. Die Lage der vier Messstellen bei den Einzeltunneln ist in der Abb. 5-20 dargestellt.

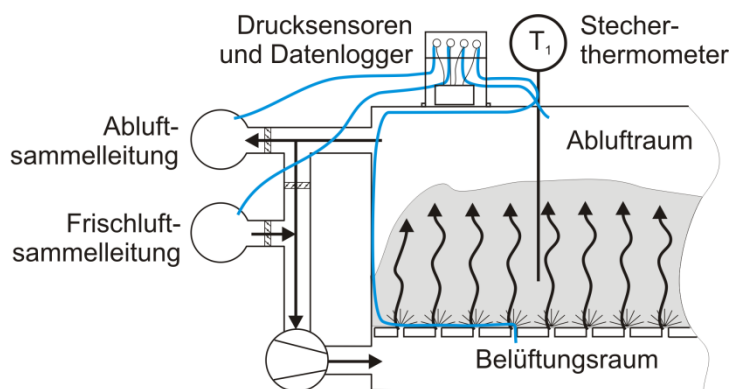


Abb. 5-20: Messstellen Differenzdruck Rottetunnel

Gewählt wurden der Abluftraum (kurz: AL-Raum), der Belüftungsraum (kurz: Bel.-Raum) sowie die Frischluft- und Abluft-sammelleitung in Position des jeweiligen Tunnels (kurz: FL- und AL-Leitung). Als schwierig in der Realisierung erwiesen sich die Druckmessungen im Belüftungsraum. Die nur durch das Haufwerk zu verlegenden Messleitungen wurden gelegentlich abgequetscht, was während eines Versuches nicht mehr zu beheben war.

Bei der zweiten Variante wurden Untersuchungen an zwei nebeneinander liegenden Tunneln (T 7 und T 8) durchgeführt. Damit sollte eine mögliche gegenseitige Beeinflussung infolge der Kopplungen über die Umluft- und Sammelleitungen aufgezeigt werden. Weil eine gleichzeitige Belegung der Reaktoren im Betriebsablauf nicht gewährleistet werden kann, wurde auf die Verlegung der Druckmessstelle im Belüftungsraum verzichtet. Messstellen befanden sich im Abluftraum der beiden Tunnel, in beiden Sammelleitungen in Position des jeweiligen Tunnels sowie zwischen den beiden Tunneln.

6 Zustand und Verhalten des Stoffsystems

6.1 Einleitung

Das Betriebsverhalten statischer Rotterektoren bestimmt das örtliche sowie gesamtheitliche Behandlungsergebnis und damit das Erreichen der Prozessziele, den zusätzlichen Aufwand in nachfolgenden Prozessschritten und den Energieverbrauch. Es beschreibt das Verhalten des Rotterektors im Betrieb und lässt sich durch den Wert und die zeitliche Veränderung von Messgrößen charakterisieren, die in der Abb. 6-1 veranschaulicht sind:

- örtliche Temperatur und Gaskzusammensetzung im Rottegut
- Temperatur und Gaskzusammensetzung in der Abluft
- Temperatur und Gaskzusammensetzung in der Zuluft
- Volumenstrom Zuluft (Ventilatorleistung)

Von den Messgrößen werden selten alle erfasst und nur manche Messgrößen dienen der Prozesssteuerung und haben somit wiederum Auswirkungen auf den Betrieb. Die Abbildung zeigt zudem eine optionale Ergänzung. Die Umluftleitung ohne Kondensator ist ein Merkmal der untersuchten und anderer MBA-Anlagen, so dass eine Einbeziehung des resultierenden Frischluftanteils (FL) in die Diskussion zum Betriebsverhalten erforderlich ist.

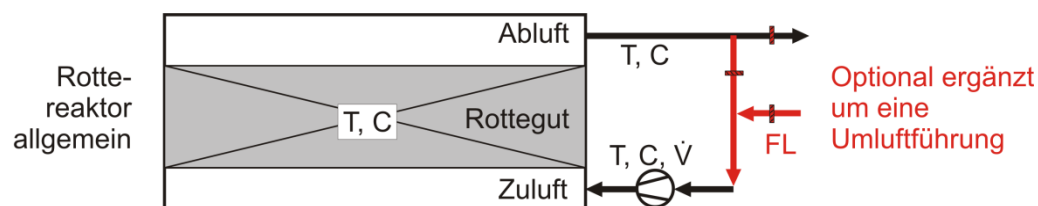


Abb. 6-1: Charakterisierung des Betriebsverhaltens an statischen Rotterektoren

Das Betriebsverhalten wird bestimmt und beeinflusst durch das Zusammenwirken von Stoffsystem und technischem System. Die qualitative Auseinandersetzung mit den Vorgängen an und in einem Rotterektor verdeutlichte, dass eine Trennung beider Aspekte in der Realität nicht möglich und zur Diskussion eine andere Differenzierung erforderlich ist. Im Mittelpunkt stehen der Rotteprozess und die potentiellen Ebenen einer Einflussnahme. Zur Beschreibung und Analyse wird folgende Struktur gewählt:

- Stoffsystem: Einflussnahme außerhalb des Rotteprozesses (Kapitel 6)
- Prozessführung: Einflussnahme während des Rotteprozesses (Kapitel 7)

Der erste Gliederungspunkt fasst alle Elemente zusammen, die bzgl. des Betriebsverhaltens im weitesten Sinne einen direkten Bezug zum Rottegut und zum Haufwerk haben. Dies be-

trifft die Anlieferung, Aufbereitung, Beschickung und Leerung des Reaktors sowie das haufwerkstechnische Verhalten während des Prozesses. Neben den stofflichen Eigenschaften sind das Stoffstrommanagement und die Wirkung des Reaktors als Bauhülle mit eingeschlossen. Der bereits definierte Ausdruck „Stoffsystem“ wird als Oberbegriff genutzt, berücksichtigt aber zusätzlich die direkten Wirkungen des technischen Systems.

Mit dem Abschluss der Reaktorfüllung verschließt sich das Stoffsystem direkten Zugriffsmöglichkeiten. Das Betriebsverhalten ist damit im Wesentlichen festgelegt, weil es aus den Eigenschaften des Rottegutes selbst hervorgeht. Dennoch bedarf der Prozess durch das Luftmanagement, die Prozessüberwachung und die Prozessregelung einer stetigen Begleitung. Damit ist eine zusätzliche Beeinflussung des Betriebsverhaltens verbunden. Die genannten Elemente sind Einflussfaktoren der als Oberbegriff zu definierenden „Prozessführung“.

Die Abb. 6-2 veranschaulicht die aufgeführte Gliederung in Einflussfaktoren schematisch für einen statischen Rottereaktor als Teil einer Rotteanlage.

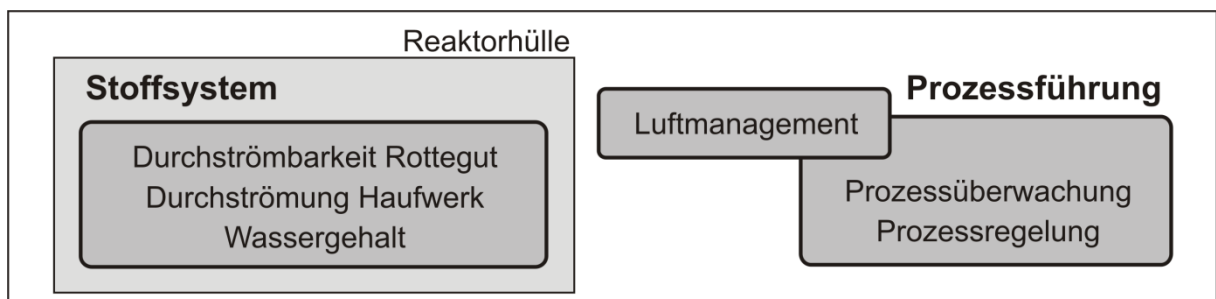


Abb. 6-2: Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten eines statischen Rottereaktors

Die stoffsystemspezifischen Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten sind Inhalt des vorliegenden Kapitels 6 und lassen sich folgendermaßen definieren:

- Durchströmbarkeit des Rottegutes
- Durchströmung des Rotteguthaufwerkes
- Wassergehalt

Die Durchströmbarkeit dient in der vorliegenden Arbeit als Hilfsgröße, um die Bedingungen für die biochemischen Prozesse im Haufwerk mithilfe physikalischer Größen zu bewerten. Sie resultiert aus den stofflichen und strukturellen Zuständen einer Schüttung und beeinflusst den Wärme- und Stoffhaushalt im Haufwerk. Die Bewertung erfolgt anhand des spezifischen Durchströmwiderstandes, der Einflussgrößen Setzungsverhalten, Schüttdichte und Wassergehalt sowie anhand von Erläuterungen zum Einfluss der physikalischen Aufbereitung.

Die Durchströmbarkeit des Rottegutes stellt allenfalls den Zustand einer oder weniger Chargen dar. Die Zustände zeigen sich im Reaktor nur dann analog, wenn das gesamte Haufwerk als bezüglich dieser Charge homogen betrachtet werden kann. In der Realität trifft diese Annahme nicht zu. Die Durchströmung des Haufwerks wird dadurch bestimmt, wie gut sich die Heterogenität von Chargen untereinander vor der Rotte verringert, welchen Einfluss die Reaktorbeschickung zeigt, wie sich eine verbliebene Heterogenität im Haufwerk darstellt, ob Randeffekte durch Randgängigkeit und Böschungen auftreten und welche Wirkung die fest in den Prozessablauf integrierte Materialumsetzung hat.

Der Wassergehalt des Rottegutes ermöglicht durch Wasserzugabe eine Einflussnahme außerhalb des Rotteprozesses. Dabei bestehen Zusammenhänge zur Zusammensetzung des Rottegutes und zur Haufwerksstruktur, es treten Änderungen durch den Prozess (biologisch bedingte Wasserfreisetzung) und die Prozessführung (Belüftung, Bewässerung) auf, die den Zustand des Stoffsystems beeinflussen.

6.2 Durchströmbbarkeit Rottegut

6.2.1 Spezifischer Durchströmwiderstand von Rottegutchargen

Die aktive Belüftung des Haufwerks stellt sich in einem Rottesystem als die zentrale Aufgabe im aeroben Abbauprozess dar. Sie lässt sich beim statischen Rotteaktor in zwei separate Eingriffsmöglichkeiten aufteilen:

- Anströmung des Haufwerks durch Belüftungseinrichtungen
- Durchströmung des Haufwerks

Die erste Möglichkeit betrifft technische Maßnahmen am Bauwerk, die zweite das Stoffsystem. Das Stoffsystem muss eine Durchströmbbarkeit gewährleisten, welche durch die strömungstechnischen Eigenschaften des Rottegutes und durch die einer Schüttung aus diesem Material bestimmt wird. Als Hilfsgröße zur Charakterisierung lässt sich der Durchströmwiderstand als integrale Kenngröße nutzen. Normiert auf die Schütthöhe ergibt sich der nur die Beschaffenheit und nicht die Schüttungsdimension kennzeichnende spezifische Durchströmwiderstand. Niedrige Werte kennzeichnen eine gute, hohe Werte eine schlechte Durchströmbbarkeit. Bei homogen verteilten Strömungswegen im Haufwerk bestimmt die Größenordnung die Intensität der Belüftung.

Zur Bestimmung wurden mit der in 5.4.1 (S. 58 ff.) beschriebenen Durchströmsäule Untersuchungen mit Rottegut der Intensivrotte durchgeführt. Für eine Vielzahl von Chargen wurde der spezifische Durchströmwiderstand fortlaufend über der Versuchsdauer ermittelt und das haufwerkstechnische Verhalten (Setzung) aufgenommen. Bestimmte physikalische Eigenschaften der Rottegutchargen wurden ermittelt und in der Tab. A-8 (S. 179) zusammengetragen. Die Versuchsdauer orientierte sich an der realen Rottedauer und betrug annähernd sieben Tage (168 h). Die Ergebnisse sind in der Abb. 6-3 dargestellt. Das auffällige Fehlen von Messwerten zwischen 48 und 96 h hat organisatorische Gründe, weil an den Wochenenden ein Betreten der Anlage und damit Messungen nicht möglich waren.

Wenn nicht speziell benannt, handelt es sich beim eingesetzten Stoffsystem um frisches Material für den ersten Rotteschritt (Eintrag). Im Diagramm ist dies durch den Markertyp „Raute“ gekennzeichnet. Für den dazugehörigen zweiten Rotteschritt sind die Kurven, falls untersucht, direkt anschließend als nächster Versuch aufgeführt und mit dem Markertyp „Quadrat“ sowie dem Namenszusatz U (für Umtrag) versehen. Ein Paar aus erstem und zweitem Rotteschritt ist zusätzlich durch denselben Farbton charakterisiert. Das Outputmaterial der Rotte (Austrag) wurde nicht untersucht, da die experimentellen Kapazitäten auf die entscheidenden Aspekte konzentriert werden mussten.

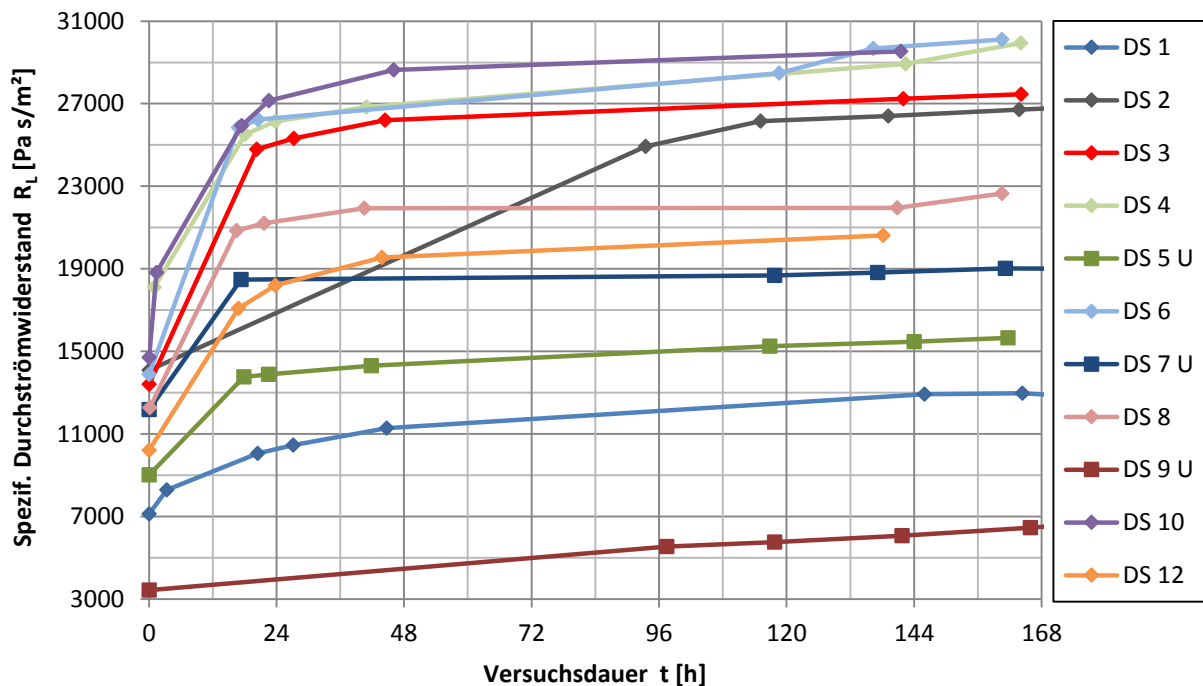


Abb. 6-3: Spezifischer Durchströmwiderstand verschiedener Chargen Rottegut

Die Ergebnisse bilden ein breites Spektrum an existierenden spezifischen Durchströmwiderständen und Kurvenverläufe mit grundsätzlich ähnlichem Verhalten ab:

- Unterschiedliche Größenordnung der Werte am Startzeitpunkt der Messung
- Nichtlineare Erhöhung mit der Versuchsdauer und Annäherung an einen Grenzwert
- Werte von Rottegut im ersten Rotteschritt größer als von Rottegut im zweiten Schritt

Mit dem Erreichen des Grenzwertes bleibt der Durchströmwiderstand bis zum Ende des Versuches annähernd konstant. Der stationäre Zustand wird überwiegend nach spätestens 48 h erreicht. Die absolute Erhöhung bis zu diesem Zeitpunkt ist in Abhängigkeit vom Niveau des Anfangswertes unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die Spannweite der ermittelten spezifischen Durchströmwiderstände zum Versuchsbeginn reicht beim Material aus dem ersten Rotteschritt von etwa 7.100 Pa·s/m² bei Versuchs-Nr. 1 bis zu annähernd 17.500 Pa·s/m² beim Material aus Nr. 4. Beim Material aus dem zweiten Rotteschritt reicht die Spanne von 3.400 Pa·s/m² bei Nr. 9 bis 12.100 Pa·s/m² bei Versuchs-Nr. 7. Die signifikanten Unterschiede in der Größenordnung der Messwerte müssen als üblich für jede MBA-Anlage angesehen werden. Eine wesentliche Ursache ist die Heterogenität in der Makroebene von Restabfall und der erzeugten Restabfallfraktion.

Die Werte aus dem zweiten Rotteschritt sind im Vergleich zu den Werten aus dem dazugehörigen ersten Schritt immer maßgebend geringer. Mit einer Reduzierung um 12 bis 72 % sind die Unterschiede deutlich ausgeprägt und können als systematisch angesehen werden. Die Intensität der Reduzierung kann nicht prognostiziert werden, weil sie von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird. Von Einfluss sind vor allem die Eigenschaften der Rottegutchargen, die Rottedauer und Effekte bei der Materialumsetzung. Die prozessseitig verbesserten Bedingungen kommen erst nach einer Materialumsetzung und nicht schon zum Ende des ersten Rotteschritts zum Tragen. Verantwortlich müssen hierfür vermutlich schwer

quantifizierbare Effekte beim Einwirken mechanischer Energie sein, z.B. die in der Literatur angesprochene Agglomeration von Feinanteilen.

In der Literatur wurden Beobachtungen zu den signifikanten Abweichungen beim Druckverlust einzelner Chargen Restabfallfraktion bislang nicht beschrieben. Ebenso sind keine Veröffentlichungen zu den Unterschieden beim Material verschiedener Rotteschritte bekannt, auch nicht für andere Arten von Rottegut. Der wahrscheinlichste Grund könnte die fehlende Messtechnik sein, weil Laboruntersuchungen aus wissenschaftlichen Gründen nicht möglich sind. Erforderlich sind Untersuchungen mit einer Materialmenge im Realmaßstab, weil nur so die für das Verhalten im Haufwerk relevanten integralen Einflüsse aufgedeckt werden können.

Die Erhöhung des spezifischen Durchströmwiderstandes über der Versuchsdauer lässt sich mithilfe der Abb. 6-4 weiter auswerten. Dargestellt ist der R_L zum Start ($t = 0$ h) und zum Ende der Messung im stationären Zustand (im Folgenden bei $t = 144$ h festgelegt).

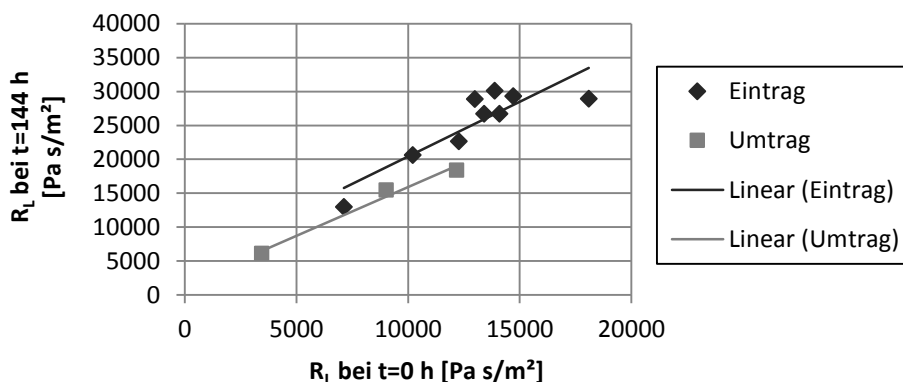


Abb. 6-4: Spezifische Durchströmwiderstände zum Start und im stationären Zustand

Sichtbar werden die Unterschiede zwischen dem Material beider Rotteschritte und eine direkte Proportionalität zwischen beiden Größen, indem R_L umso größer wird, je größer der Anfangswert ist. Am Ende liegt der Wert um das 1,5- bis 2,2-fache höher als am Anfang. Die Proportionalität begründet sich aus identischen geotechnischen Effekten, denen die Schüttung unterliegt. Allerdings existiert eine Streuung der Werte von der Linearität. Eine mögliche Ursache ist die Wechselwirkung der im Rottegut enthaltenen Komponenten untereinander.

6.2.2 Wirkung von Setzungsverhalten, Schüttdichte und Wassergehalt

Die Erhöhung des Durchströmwiderstandes über der Versuchsdauer beruht auf dem geotechnischen Verhalten der Schüttung. Das Eigengewicht und die Auflage von weiterem Material führen durch Schwerkraftwirkung zur Verringerung der Schütthöhe. Die Setzung ΔH bewirkt eine Materialverdichtung und folglich eine Abnahme des freien Luftporenvolumens. Im stationären Zustand kommt es zu keiner Änderung der haufwerkstechnischen Größen mehr, so dass die Größenordnungen auf die Werte am Startzeitpunkt bezogen werden können. In der Abb. 6-5 wurden die Werte von R_L im stationären Zustand (bei $t = 144$ h) und der Setzung jeweils auf den eigenen Anfangswert zum Zeitpunkt Null bezogen und das resultierende ΔR_L über ΔH aufgetragen.

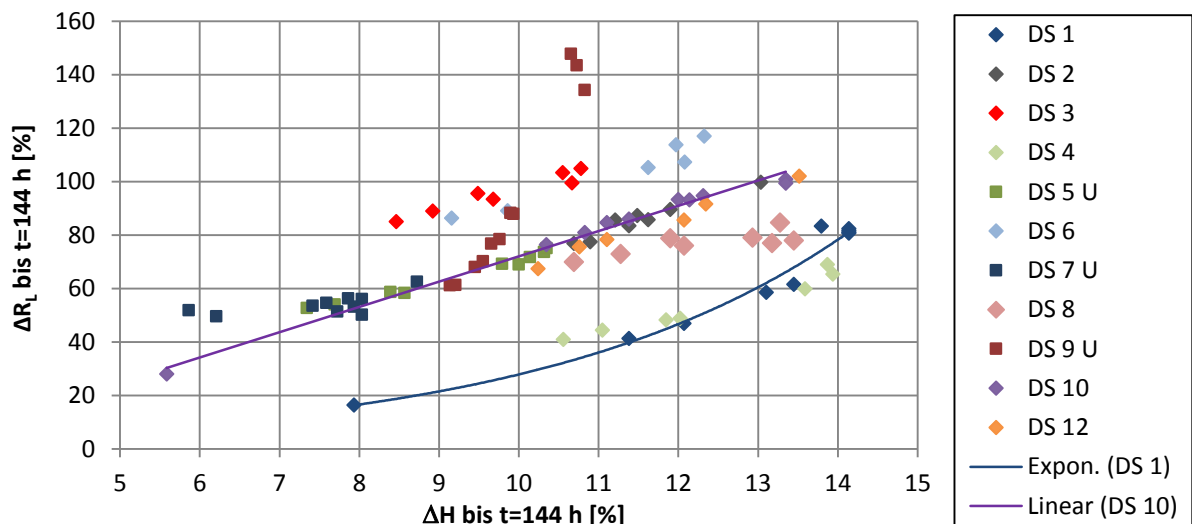


Abb. 6-5: Veränderung des spezifischen Durchströmwiderstandes mit der Setzung

Es liegt eine Häufung von Messpunkten im Kern des Diagramms vor. Gleichwohl existieren Abweichungen von sechs der elf Versuche, so dass sich keine Systematik ableiten lässt. Alle Fälle stellen Zustände dar, die in der Realität auftreten. Beispielhaft sind für zwei Versuche die Trendlinien der Verläufe eingezeichnet. Ergebnisse sind:

- Linearer bis leicht exponentieller Zusammenhang zwischen ΔR_L über ΔH
- Geringe Zunahme der Setzung (ΔH) bewirkt eine große Erhöhung von R_L

Tritt beispielsweise eine Setzung von 10 % auf, verringert sich die Schütthöhe von 2,90 m auf 2,61 m. Der spezifische Durchströmwiderstand steigt um 60 bis 90 %, in einem Fall aber auch nur um 30 %. Derartige Erkenntnisse sind relevant für das Betriebsverhalten, weil aus den Unterschieden entsprechende Abweichungen bei der Durchströmung resultieren.

Eine wichtige integrale Kenngröße zur Beschreibung der Haufwerksstruktur ist die Schüttdichte. Die Abb. 6-6 zeigt, dass weitestgehend ein linearer Zusammenhang zwischen der Schüttdichte der ersten Messung (Start) und der im stationären Zustand (Ende) ermittelt werden konnte. Umso größer der Wert zum Start ist, umso größer ist dieser am Ende. Ursache ist die Kopplung über die Setzung. Weil aufgrund des Zusammenhangs zwischen Start- und Endwerten nur eine der beiden Schüttdichten betrachtet werden muss, wird im Folgenden diejenige im stationären Zustand gewählt.

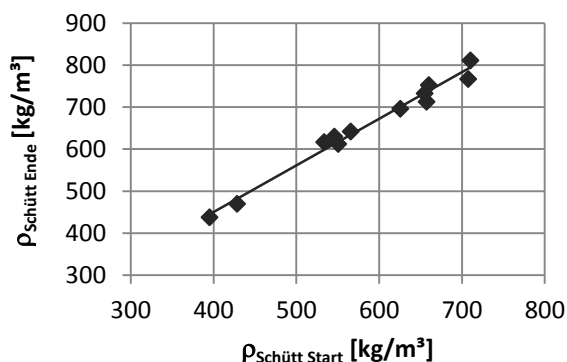


Abb. 6-6: Korrelation zwischen der Schüttdichte am Ende und Start der Versuche

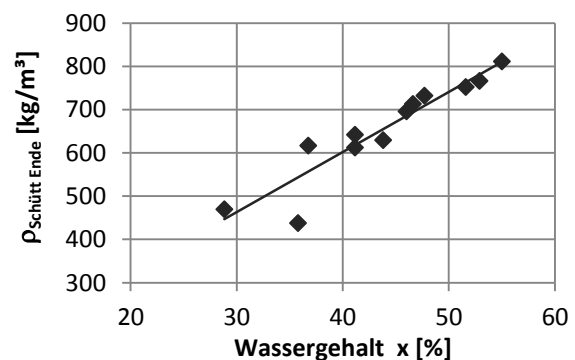


Abb. 6-7: Korrelation zwischen der Schüttdichte am Ende und dem Wassergehalt

Die Schüttdichte wird durch die Masse des Materials und diese wiederum durch das enthaltene Wasser bestimmt. Die Abb. 6-7 zeigt einen weitestgehend linearen Zusammenhang zwischen Schüttdichte und Wassergehalt, aber vereinzelt auch Abweichungen. Erhöht sich die Wassermenge, steigt auch die Dichte des Materials und umgekehrt. Der Einfluss des Wassergehaltes auf die Materialmasse wird deutlich, wenn die Nassschüttdichte der theoretischen Trockenschüttdichte ($m_{\text{Feststoff, trocken}}/\text{Volumen}$) gegenübergestellt wird. Die Abb. 6-8 zeigt, dass der rechnerische Ausschluss des Wassers zu ähnlichen Werten bei der Schüttdichte der Chargen führt, während real große Unterschiede vorliegen.

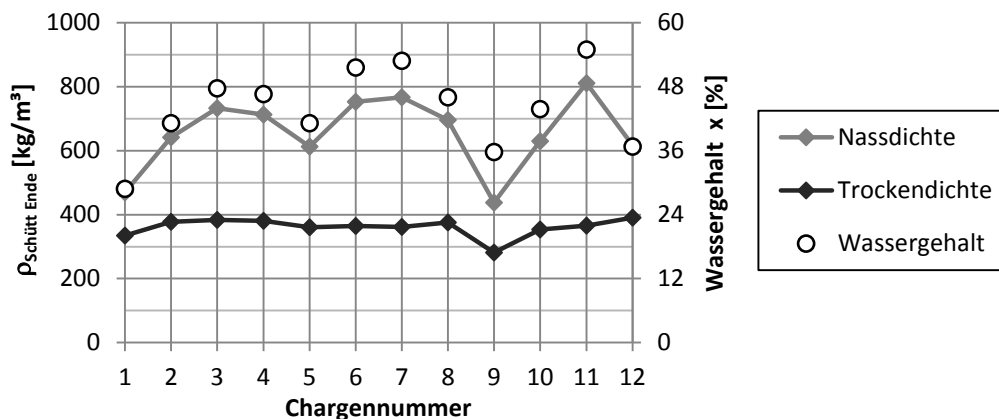


Abb. 6-8: Trocken- und Nassschüttdichte sowie Wassergehalt verschiedener Chargen

Bei der Trockendichte weicht die Charge 9 aus der Messwertreihe ab. Bleibt dieser Ausreißer unberücksichtigt, ergeben sich bei der Trockendichte eine Standardabweichung von 16 kg/m³ und bei der Nassdichte von 95 kg/m³. Es ergibt sich selbst unter Herausnahme des vermeintlichen Ausreißers (Charge 9) eine Spannweite bei der Nassschüttdichte von 282 kg/m³. Es ist zu schlussfolgern, dass diese Unterschiede typisch für verschiedene Chargen einer Restabfallfraktion sind. Die Ergebnisse zeigen:

- Dichteunterschiede resultieren wesentlich aus dem Wassergehalt im Stoffsystem

Da Wasser vor allem mit der nativ-organischen Substanz in das Stoffsystem eingebracht wird, ist bei einem höheren Wassergehalt ein größerer Anteil dieser Organik wahrscheinlich. Deshalb sind grobe Aussagen zur Zusammensetzung des Stoffsystems möglich.

Bei klassischen Schüttgütern aus einer Materialart bzw. aus charakterisierbaren Mischungen besteht ein definierter Zusammenhang zwischen Wassergehalt und resultierender Schüttdichte. Deshalb sind die Bestimmung einer Größe aus der jeweils anderen und Aussagen zum Setzungsverhalten möglich. Restabfallfraktionen bestehen aus vielen Komponenten in undefinierten Zusammensetzungen sowohl zwischen einzelnen Chargen als auch in der Verteilung (Homogenität) innerhalb einer Charge. Es muss deshalb geschlussfolgert werden, dass sich das Verhalten von Restabfallfraktionen bezüglich des diskutierten Zusammenhangs von klassischen Schüttgütern unterscheidet. Der Zielstellung zur Erarbeitung technischer Lösungen folgend, müssen alle denkbaren integralen Parameter auf ihre Eignung zur Beschreibung des Stoffsystems untersucht werden.

Weil die Materialmasse den statischen Druck im Haufwerk bestimmt, ist ein Zusammenhang zwischen Nassschüttdichte und Setzung zu erwarten. Es ist zu analysieren, ob dieser sys-

tematisch ist oder durch weitere Faktoren überlagert wird. Die Abb. 6-9 stellt beide Größen im stationären Zustand gegenüber. Die Setzung ist auf die Anfangsschütthöhe bezogen und als prozentualer Wert angegeben.

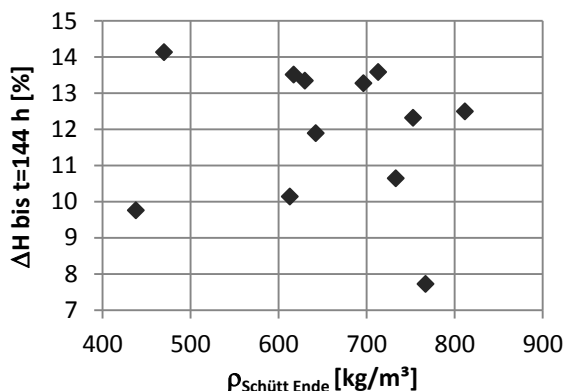


Abb. 6-9: Korrelation zwischen Setzung und Schüttdichte im stationären Zustand

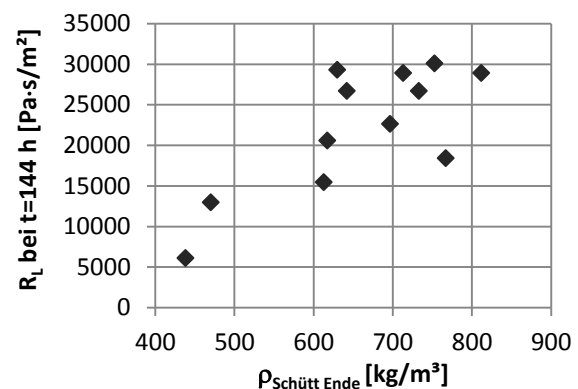


Abb. 6-10: Korrelation zwischen spezifischem Durchströmwiderstand und Schüttdichte im stationären Zustand

Die Ergebnisse zeigen:

- Intensität der Setzung ist unabhängig von der Schüttdichte

Es wurde vermutet, dass eine größere Dichte zu einer größeren Setzung führt, weil sie bei konstanter Schütthöhe Folge einer erhöhten Materialmasse ist. Aufgrund der Beziehung zwischen Schüttdichte und Wassergehalt existiert auch keine Korrelation zwischen Setzung und Wassergehalt. Die Setzung muss als nicht quantifizierbaren Einflussfaktor auf Wechselwirkungen der im Abfall enthaltenen Komponenten beruhen, die trotz ähnlicher Trockendichte zu unterschiedlich stabilen Haufwerksstrukturen führen.

Zu bewerten ist abschließend noch der Zusammenhang zwischen Schüttdichte und spezifischem Durchströmwiderstand. Die Abb. 6-10 zeigt, dass R_L umso größer ist, je größer die Dichte ist. Allerdings ist festzustellen:

- Spezifischer Durchströmwiderstand korreliert nur unscharf mit der zugrundeliegenden Schüttdichte

So existiert beispielsweise um $29.000 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ eine große Spannweite an Schüttdichten zwischen 630 und 811 kg/m^3 . Dass sich bei einer deutlich größeren Versuchszahl eine Spezifizierung herausbildet, ist nicht zu erwarten. Es wird sich vermutlich eine „Wolke“ aus Datenpunkten bilden und damit ebenso keine klaren Aussagen zulassen. Die Ergebnisse mögen zunächst irritieren, weil die Schüttdichte integral die Packung der Schüttung und damit vermeintlich die Porosität bestimmt. Die Ergebnisse können dennoch plausibel sein, weil sich aus der Schüttdichte allein keine Aussagen zur Struktur des vorliegenden Haufwerkes und damit der Durchströmbarkeit ableiten lassen. Beispielsweise erhöht die Agglomeration schwerer, nasser Partikel die Dichte, schafft in der Umgebung davon aber gegebenenfalls durchströmbare Makroporen mit Auswirkungen auf den Druckverlust.

Aufgrund der Partikelgrößenverteilung der Restabfallfraktionen lässt ein größerer Wassergehalt einen höheren Anteil nativer Organik und damit einen erhöhten Anteil an Feinfraktion

im Stoffsystem (vgl. Abb. 4-4, S. 30) sowie eine kompaktere Haufwerksstruktur vermuten. Auch eine mögliche Zunahme des Anteils kleiner Fraktionen (< 20 mm) mit der Behandlungsdauer ist möglich (vgl. 4.1.2, S. 27 ff.). Beide Aspekte müssten die Durchströmbarkeit verschlechtern. Dieser Zusammenhang konnte jeweils nicht nachgewiesen werden, so dass eventuelle Effekte in den untersuchten Größenverhältnissen durch andere Einflüsse überdeckt sein müssen.

Für die Analyse wurden gezielt einfache und gut reproduzierbare Methoden ausgewählt, um zu erwartende Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern zu untersuchen. Diese sollten leicht anwendbar sein, sich zur Optimierung von Anlagen eignen und sich in die betriebliche Praxis einordnen lassen. Die Ergebnisse zeigten Verhältnisse im Abfallhaufwerk, die Erklärungen mit den gewählten Methoden nur zum Teil zulassen. Die Problematik bestätigte sich durch Untersuchungen mit aerob stabilisiertem Gärrest einer nach dem anaeroben Prinzip arbeitenden MBA-Anlage [Weichert & Brummack, 2013]. Beim untersuchten Stoffsystem handelte es sich um eine Mischung von mechanisch entwässertem mit zusätzlich thermisch getrocknetem Material. Der Wassergehalt der Mischung lag bei ca. 55 % und die Schüttdichte bei 728 kg/m^3 . Der spezifische Durchströmwiderstand im stationären Zustand war mit $6.800 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$ bedeutend niedriger als beim MBA-Rottegut, obwohl die Schüttdichte höher lag. Es lässt sich schlussfolgern, dass eine Bewertung der strömungstechnischen Bedingungen eines Haufwerks nur anhand des Durchströmwiderstandes und nicht anhand anderer leicht anwendbarer physikalischer Messgrößen möglich ist.

6.2.3 Einfluss der physikalischen Aufbereitung

Die Durchströmung des Haufwerks ist zur Sauerstoffversorgung und zum Abtransport der Stoffwechselprodukte, aber auch zum Austrag der bilanziell überschüssigen Wärme des exothermen biochemischen Prozesses notwendig (vgl. 4.2, S. 36 ff.). Prozessseitig stellt damit auch die Wärmebilanz einen limitierenden Faktor des aeroben Abbaus dar. Die erhöhte Oberflächentemperatur der biogenen Partikel muss durch Wärmeübertragung an andere Partikel oder an eine kontinuierliche Phase gesenkt und die Wärme aus dem Haufwerk ausgetragen werden. Ein Wärmeartrag ist nur möglich, wenn die Partikel von einem Luftstrom direkt erreicht werden. Die Abb. 6-11 veranschaulicht die Vorgänge mit treffender Vereinfachung.

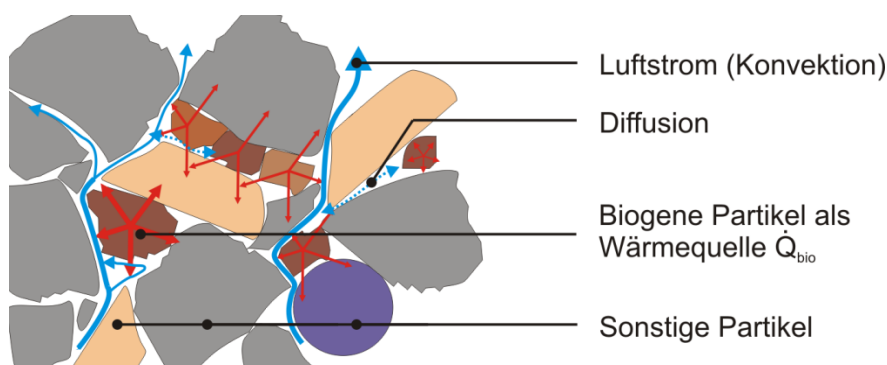


Abb. 6-11: Wärmehaushalt eines Rottehaufwerkes

Abseits des Hauptluftstroms können kleine Luftströme und eine Diffusion zur Sauerstoffversorgung vorliegen. Für die Wärmeabfuhr hat dies kaum eine Bedeutung. Notwendig ist eine Haufwerksstruktur, die eine ausreichend gute Durchströmbarkeit gewährleistet, um einen bestimmten Durchsatz an Luft zuzulassen. Ausschlaggebend ist hierfür die Situation nach der Materialsetzung, also im bzgl. des Setzungsverhaltens stationären Zustand. Die Verfahrensschritte zur physikalischen Aufbereitung des Rottegutes vor der Rotte werden dem Anspruch an die Haufwerksstruktur nicht gerecht.

Die Wirkung der Vorzerkleinerung beruht im Wesentlichen auf der Öffnung von Gebinden, der Zerkleinerung sehr großer Komponenten und dem partiellen Dekompaktieren (Auflösen formschlüssiger Verbindungen). Die Effekte auf die leicht abbaubare Fraktion lassen sich nur schwer quantifizieren. Die enthaltenen Komponenten werden aufgrund ihrer hohen Plastizität und ihrer überwiegend ohnehin schon geringen Größe vermutlich kaum eine Zerkleinerung erfahren. Durch die Bewegung dieses wasserhaltigen Materials in den anschließenden Aggregaten und bei der Reaktorbeschickung ist sogar eine Vergrößerung wahrscheinlich (vgl. Sekundärpartikel in Abb. 2-3, S. 9). Die Vorzerkleinerung führt zur Angleichung der Partikelgrößen und damit zur Verringerung des durchströmbareren Luftporenvolumens. Die Abb. 6-12 zeigt die Effekte links für unzerkleinertes und mittig für zerkleinertes Material desselben Volumens.

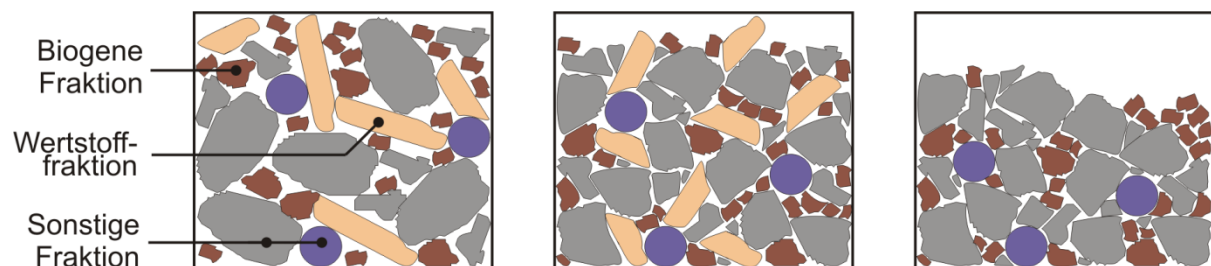


Abb. 6-12: Rottegutabhängige Haufwerksstruktur: unzerkleinert (links), zerkleinert (Mitte) und Material nach Zerkleinerung und Stoffstromtrennung (rechts)

Ein Teilstrombetrieb der MBA-Anlage führt darüber hinaus durch eine Stoffstromtrennung vor der Rotte zur Abtrennung von strukturgebenden Komponenten. Prozessseitig verschlechtern sich hierdurch die Bedingungen weiter. Die Abbildung zeigt die Auswirkungen rechts und im Vergleich zum zerkleinerten Material (Mitte):

- Weitere Verringerung der Porosität nach der Vorzerkleinerung
- Anreicherung an biologisch leicht abbaubaren Komponenten

Die ungenügende Strukturgebung infolge zu weniger stützender Komponenten verschlechtert die Durchströmbarkeit des Haufwerks und führt zu einer geringeren mechanischen Stabilität gegen natürliche Kompression (Materialsetzung). Weil die biogenen Komponenten eine Wärmequelle darstellen, führt deren Anreicherung im Haufwerk zugleich zur Erhöhung der biologisch bedingten volumenspezifischen Wärmefreisetzung. In Summe ergeben sich prozessseitig schwer zu führende Zustände mit Auswirkungen auf das Betriebsverhalten, weil die freigesetzte Wärme aufgrund der für die Belüftung ungünstigen Haufwerksstruktur schlecht ausgetragen werden kann.

6.3 Durchströmung Rotteguthaufwerk

6.3.1 Heterogenität von Rottegut

Die Untersuchungen zur Durchströmbarkeit zeigten eine ausgeprägte Heterogenität in wichtigen stoffsystemspezifischen Parametern verschiedener Chargen Rottegut. Eine wesentliche Ursache ist die Heterogenität in der Makroebene des Ausgangsmaterials. Es ist nachfolgend zu diskutieren, welchen Einfluss die der Rotte vorgeschalteten Prozessstufen auf die Heterogenität des Stoffstroms Rottegut haben.

Der Stoffstrom durchläuft in der Stufe der physikalischen Aufbereitung mehrere Aggregate zur Zerkleinerung und zur Stoffstromtrennung. Eine Angleichung der Partikelgrößen und der Zusammensetzung kann aufgrund der Vielzahl an Komponenten samt deren Eigenschaften und der geringen Trenngüte nicht erfolgen (vgl. Problemanalyse zum realen Reaktor in 3.2, S. 20 ff.). In der Stufe wären eine ausreichende Rückvermischung der Chargen und damit eine breite Verweilzeitverteilung aller Komponenten erforderlich. Die Verweilzeit stellt sich als Aufenthaltsdauer von der Materialaufgabe in den Vorzerkleinerer bis zum Erreichen des Rottereaktors dar. Es war nicht zu erwarten, dass im Durchlauf des Stoffstroms nennenswerte Homogenisierungseffekte erreicht werden können. Das Verfahrensschema zur untersuchten Anlage in der Abb. 5-1 (S. 50) verdeutlicht folgende Quellen für den Stoffstrom an Rottegut:

- Feinfraktion des Trommelsiebs (Stoffstrom < 70 mm) als Hauptstrom
- Mittelfraktion des Trommelsiebs (70 bis 300 mm) gelangt nach Durchlauf der Stoffstromtrennung als Feingut des ballistischen Siebers in den Hauptstrom

Zur Demonstration der Effekte wurden an der MBA-Anlage A durch die TU Dresden im Vorfeld zur vorliegenden Arbeit Untersuchungen durchgeführt. Ansatzpunkt war die Bestimmung der durchschnittlichen Verweilzeit und des Verweilzeitspektrums des Materials in der physikalischen Stufe. Hierzu wurden auf den Polypgreifer zur Beschickung des Vorzerkleinerers gleichgroße, visuell auffällige Spanplattenstücke aufgegeben, wie es die Abb. 6-13 links zeigt. Mit einer Größe von 50 x 50 mm waren die Stücke siebgängig (70 mm Sieb). Die Charge durchlief im kontinuierlichen Betrieb zusammen mit weiteren Chargen die physikalische Aufbereitung.



Abb. 6-13: Bewertung von Verweilzeit und Homogenisierung des Inputmaterials in der Stufe der physikalischen Aufbereitung (links: aufgebrachter Tracer, rechts: Ergebnis) [IVU, o.J.]

Das Resultat wurde an der Übergabestelle zur biologischen Stufe, dem Steigband zur Decke der Tunnelfüllhalle, visuell bewertet. Die Abbildung zeigt rechts, dass der aufgebrauchte Impuls (eine Art Tracer) sichtbar wird. Auf dem Steigband ergibt sich im Stoffstrom gleichmäßig verteilt eine Kette von Stücken. Nicht sichtbar ist, dass im Vorlauf und Nachlauf dieser Momentaufnahme eine vereinzelt Anhäufung von Stücken registriert wurde. Das Verweilzeitspektrum ist sehr eng, weshalb die durchschnittliche Verweilzeit einer Charge bestimmt werden konnte. Diese betrug etwa 30 min. Die Streckung des Impulses resultiert aus der Verteilung des aufgegebenen Materials mit einer geringen Schütthöhe (max. 3 cm) auf den Transportbändern. Bei einer wirkungsvollen Rückvermischung würde sich der aufgebrauchte Impuls deutlich weiter auf dem Transportband entlang strecken. Die Untersuchung verdeutlicht, dass ein nennenswerter Abbau der vorhandenen Heterogenität im Stoffstrom trotz der Vielzahl an Aggregaten nicht stattfindet.

Sinnbildlich für die fehlende Rückvermischung waren Beobachtungen im Winterhalbjahr, als unterschiedlich temperierte Chargen in den Reaktor eingetragen wurden. Es konnten Situationen entstehen, bei denen zum Startzeitpunkt des Prozesses Haufwerkstemperaturen zwischen nahe Null und 30 °C vorlagen. Der mangelnde Abbau der Heterogenität ist die logische Konsequenz fehlender Homogenisierung in einem kontinuierlichen Stoffstrom. Ein zur Rückvermischung notwendiger Eintrag mechanischer Energie erfolgt für den Gesamtstoffstrom nur in der Siebtrommel. Der kontinuierliche Betrieb der Trommel verhindert positive Effekte, weil sich ein nahezu stationärer Zustand der Fließwege des Materials im Inneren des Apparates einstellt. Ähnliche Effekte zeigen Homogenisierungstrommeln, wenn diese kontinuierlich (nicht batchweise) betrieben werden und nicht ausreichend groß ausgelegt sind, d.h. nicht das Volumen des in den Reaktor einzubringenden Materials fassen.

Die Umstände führen dazu, dass die Aufgabe zum Abbau der Heterogenität im Wesentlichen an der Schnittstelle zwischen Abfallbunker und physikalischer Stufe verbleibt. Die in biologischen Behandlungsanlagen verbreitet eingesetzten Flachbunker bieten hierfür schlechte Voraussetzungen. Die vergleichsweise geringe abgelagerte Materialmenge und die räumliche Enge sowie organisatorische Konflikte zwischen Anlieferfahrzeugen sowie stationären und mobilen Maschinen in diesem Anlagenbereich bieten nur begrenzt Möglichkeiten zur Durchmischung.

6.3.2 Varianten der Reaktorbeschickung

Die vorangegangenen Kapitel haben große Unterschiede bei der Durchströmbarkeit verschiedener Chargen Rottegut und eine unzureichende Rückvermischung des Stoffstroms in der physikalischen Aufbereitung gezeigt. Im Verfahrensablauf durchläuft der Stoffstrom anschließend die Technik zur Reaktorbeschickung, so dass die Wirkungen dieses Verfahrensschrittes untersucht werden müssen. Im Folgenden ist zu diskutieren, ob die Heterogenität des Rottegutes verringert wird und welche Auswirkungen auf die Durchströmung des Haufwerkes zusätzlich auftreten. Die Abb. 6-14 zeigt die potentiellen Varianten zur Beschickung statischer Rottoreaktoren:

- Manuell und schaufelweise durch Befahren mit Radladern (Variante 1)
- Automatisiert und kontinuierlich mit Förderbändern
 - Teleskopierbare Bänder für den Transport und Schleuderband zur Verteilung
 - Horizontalband unter oder über der Reaktordecke (Variante 2)
 - Steigband im Inneren des Reaktors (Variante 3)
 - Verfahrband unter der Reaktordecke (Variante 4)

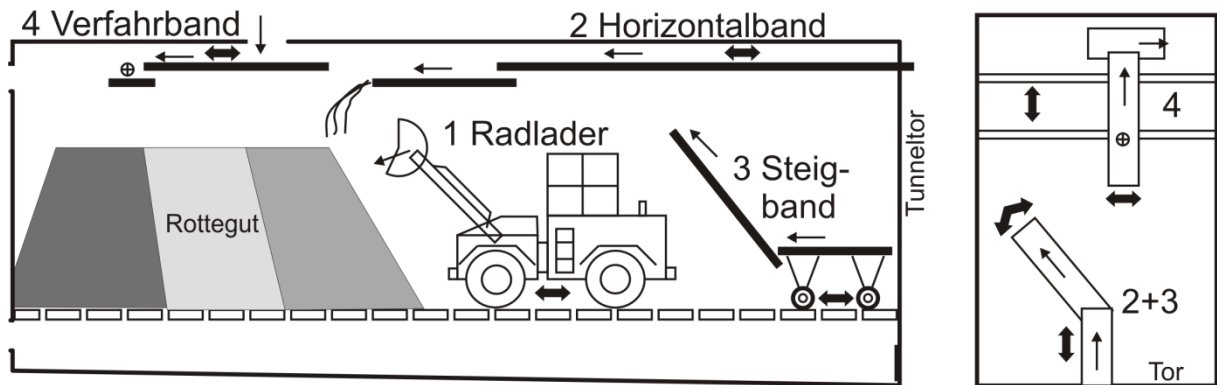


Abb. 6-14: Verfahrensvarianten einer Reaktorbeschickung (Längs- und Draufsicht)

Merkmal der automatisierten Systeme ist ein Schleuderband oder ein Verfahrband zur Verteilung des Rottegutes zwischen den beiden seitlichen Reaktorwänden. Die Abbildung zeigt die Wirkungsweise rechts unten für das Schleuderband und rechts oben für das Verfahrband in der Reaktordraufsicht. Die Schleuderbänder fahren in das Innere des Reaktors ein. Dies erfolgt entweder an der Reaktordecke in Form eines Horizontalbandes oder auf dem Reaktorboden in Form eines Steigbandes als Teil eines Kopfwagens. Die letztgenannte Variante liegt an den untersuchten MBA-Anlagen vor. Bei nach oben offenen Reaktoren können die Bänder auch über der Reaktordecke angeordnet sein. Beim Verfahrband werden längs- und querfahrbare Bänder an der Reaktordecke eingefahren und das Material durch eine Öffnung in der Decke zugeführt. Dies erfordert breite Reaktoren und ist damit bei Rottetunneln nicht umsetzbar.

In den Varianten 1 bis 3 wird der Reaktor von der hinteren Wand nach vorn in Richtung Tunneltor beschickt. Daraus ergeben sich folgende Situationen für das Haufwerk, welche in der Abbildung anhand der grauen Farbgebung verdeutlicht sind:

- Segmentweise Einlagerung von Chargen über der Reaktorlänge
- Auslaufen des Haufwerks in Form einer Böschung

Die segmentweise Einlagerung von Rottegut führt zu einer großräumigen, systematischen Heterogenität an Chargen im Reaktor. Böschungen sind zwingend verbunden mit dem Radlader- und Steigbandbetrieb. Allein deren Größe kann durch das Einsetzen eines Schotts am Tunneltor verringert werden. Dieses wäre jedoch stets zu niedrig, weil die notwendige Höhe eine komplette Reaktorfüllung unmöglich machen würde. Beim Horizontalbandsystem kann eine Böschung hingegen durch ein ausreichend hohes Schott verhindert werden. Die segmentweise Einlagerung und eine Böschung sind zusammen nur beim Einsatz eines Verfahrbandes zu umgehen, weil die Beschickung bei dieser Variante in Lagen auf ganzer Fläche erfolgt und ein Schott in ausreichender Dimension anwendbar ist.

Aus dem Einsatz von Schleuderbändern (Variante 2 und 3) resultieren besondere Effekte. Merkmal ist ein sich ausbildender Schüttkegel, wie es die Abb. 6-15 beispielhaft als Draufsicht des Rottetunnels zeigt. Das Material wird zunächst auf der linken Seite eingetragen, bis der resultierende Böschungswinkel ein bestimmtes Ausmaß angenommen hat (Registrierung mit Steuerklappe, vgl. Abb. 5-3 rechts, S. 51). Die Höhe des Schüttkegels entspricht dann der festgelegten Schütthöhe des Haufwerks. Das Schleuderband schwenkt rechts und errichtet in Querrichtung des Tunnels einen neuen Schüttkegel. Ist die Reihe gefüllt, setzt das Band zurück in der Längsrichtung.

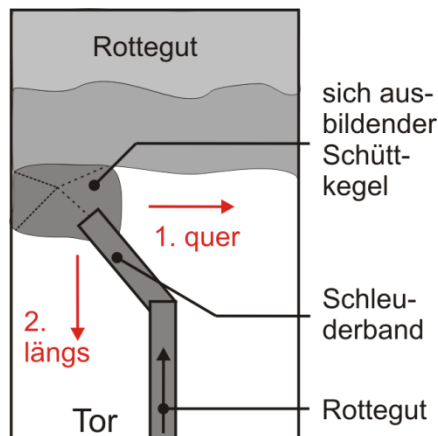


Abb. 6-15: Schüttkegelausbildung (Draufsicht Rottetunnel)

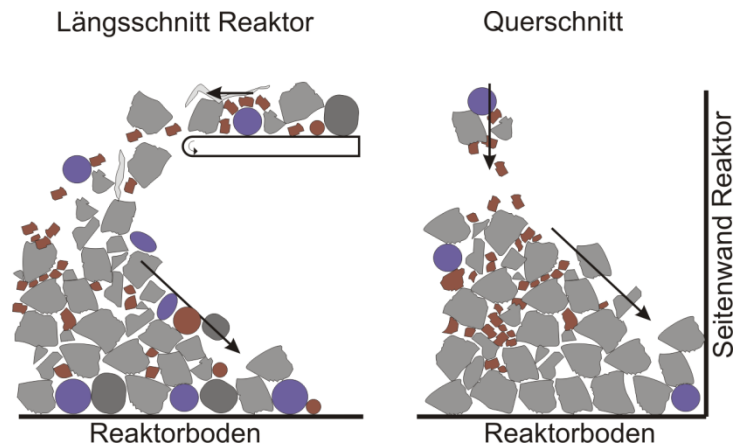


Abb. 6-16: Separierung beim Abwurf von Rottegut durch die Flugbahn und nach dem Auftreffen auf das Haufwerk

Mit dieser Art der Reaktorbeschickung muss eine ungewollte Veränderung der Eigenschaften des Stoffsystems verbunden sein. Der Stoffstrom beschreibt bei Bandsystemen infolge hoher Bandgeschwindigkeiten beim Abwurf eine Flugbahn, die aufgrund ungleicher Partikelformen und -dichten zu einer Separierung bestimmter Komponenten führt. Die Abb. 6-16 zeigt dies links beispielhaft. Leichte Teile werden durch die Luft stärker abgebremst als schwere Teile und treffen auf der Schüttung näher an der Abwurfstelle auf. Auch unterschiedliche Projektionsflächen in Strömungsrichtung (Widerstandsflächen) führen zu Effekten. Biogene Partikel werden aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Dichte vermutlich eher eine längere Flugbahn aufnehmen. Eine Quantifizierung erfolgte nicht, weil die Wirkungen durch einen Aspekt überlagert werden, der mit der Ausbildung des Schüttkegels in Verbindung steht.

Nach dem Auftreffen auf den Schüttkegel kommt es zu einer weiteren Separierung. Schüttgüter entmischen sich vor allem nach der Partikelgröße, der Partikeldichte, der Form und Oberflächenrauigkeit [Schulze, 2009]. Es treten folgende Effekte auf, die in der Abb. 6-16 am Schüttkegel ersichtlich sind:

- Roll- und gleitfähige Teile bewegen sich den aktuell entwickelnden Schüttkegel zu allen Seiten hinunter und lagern sich am Boden und an Wänden des Reaktors ab
- Kleinere Partikel füllen auf ihrem Weg Hohlräume der Schüttungsoberfläche aus

Es kommen verstärkt große Teile am Boden und den Wänden an. Kleinere Partikel werden den Boden dennoch erreichen, weil diese aufgrund des hohen Anteils im Stoffstrom und der sehr großen Bandbeladung mit dem Strom nach unten gerissen werden. Die Separierung

fällt in jedem Fall umso stärker aus, desto mehr sich einzelne Partikel unterscheiden. Damit ist folgende prozesstechnisch relevante Situation im Haufwerk verbunden:

- Größere Porosität an den Wänden und am Boden als in den übrigen Bereichen

Die abweichende Porosität führt bei der Belüftung des Haufwerks zu einer stärkeren Durchströmung der Randbereiche (Wand, Boden) in Form einer Randgängigkeit. Auch die segmentweise Einlagerung von Chargen abweichender Durchströmbarkeit und Böschungen im Haufwerk führen zu einer inhomogenen Durchströmung. Alle drei Situationen müssen aus theoretischer Betrachtung signifikante Auswirkungen auf das Betriebsverhalten des Haufwerkes haben. Diese sind in den folgenden Kapiteln zu diskutieren und nachzuweisen.

Die Effekte der Separierung durch das Abrollen können auch beim Radladerbetrieb beobachtet werden, sind aber weniger stark als bei den Bandsystemen ausgeprägt. Ursachen sind die fehlende Flugbahn bei der Reaktorbeschickung und eine breite Schüttung, weil die Radladerschaufel fast die Breite des Reaktors einnimmt. Mit dem Radladerbetrieb ist jedoch ein anderes Problem verbunden. Infolge der Vielzahl an Ein- und Ausfahrten kommt es unvermeidlich zu einer Verstopfung von Belüftungslöchern im Bereich der Fahrspuren. Das Verschließen dieser Flächen führt zu einer verstärkten Anströmung und damit ggf. Durchströmung der übrigen Bereiche des Belüftungsbodens, also der Mitte und der Ränder.

6.3.3 Heterogenität im Haufwerk

Die bisherigen Ausführungen zeigten ein breites Spektrum bei der Durchströmbarkeit verschiedener Chargen Rottegut. Die Bedingungen im Haufwerk eines Rottereaktors müssen als noch komplexer angesehen werden, weil das in der Messtechnik (Durchströmsäule) untersuchte Material aufgrund der Probenvorbereitung je Charge als homogenisiert gilt. Der theoretische Ansatz zeigt für das Haufwerk in einem Reaktor eine Vielzahl solcher Volumenelemente. Im Inneren weisen diese Säulen in der Realität eine Ungleichheit auf. Die Bedingungen führen in Summe zu einer ausgeprägten Heterogenität im Haufwerk, die sich im Betriebsverhalten und in den Prozessergebnissen widerspiegeln muss.

Statische Rottereaktoren in MBA-Anlagen zeichnen sich aus ökonomischen Gründen durch gewaltige Dimensionen aus. Bei den untersuchten Anlagen beträgt die Länge eines Tunnels 30 m bei einer Querschnittsfläche von 5 x 4,5 m. Die Schütthöhe beläuft sich auf bis zu 3 m, wodurch sich ein theoretisches Fassungsvermögen von 450 m³ ergibt (ohne Berücksichtigung von Böschungen). Wird die Nutzlast eines Sammelfahrzeugs von 10,5 t zu 80 % erreicht (= 8,4 t), wovon 50 % in die biologische Behandlung gelangen und der Rest abgetrennt wird, resultiert für eine Schüttdichte des Rottegutes von 560 kg/m³ pro Fahrzeug ein Volumen von 7,5 m³ Feingut. Zur Tunnelfüllung werden damit 60 Fahrzeugladungen benötigt.

Jede Fahrzeugladung stellt mindestens eine Charge Restabfall dar. Weil eine Rückvermischung von Chargen vor dem Reaktor nicht erfolgt, fällt das Rottegut am Reaktor chargenweise an (vgl. 6.3.1, S. 78 ff.). Mit den verbreitet eingesetzten Varianten der Reaktorbeschickung werden die Chargen segmentweise über der Reaktorlänge eingelagert (vgl. Abb. 6-14, S. 80). Es ergeben sich unvermeidbar lokale Ungleichheiten bei prozessrelevanten Eigen-

schaften, von denen die Durchströmbarkeit eine Wesentliche ist. Damit gehen häufig zugleich Abweichungen in der biologischen Aktivität, der Wärmefreisetzung und im Wassergehalt einher. Die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten werden mithilfe der Abb. 6-17 diskutiert. Dargestellt ist, stark schematisiert anhand von zwei Chargen, die durch die segmentweise Einlagerung hervorgerufene Heterogenität im Haufwerk.

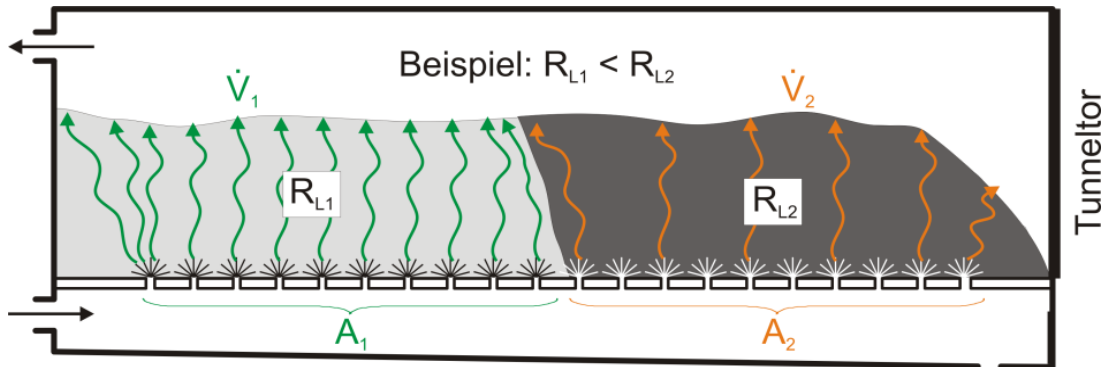


Abb. 6-17: Heterogenität des Haufwerks am Beispiel von zwei Chargen im Rotteraktor

Die Durchströmbarkeit ist anhand der spezifischen Durchströmwiderstände R_L charakterisiert. Die Charge 1 besitzt beispielhaft einen geringeren Wert als Charge 2. Rottegut mit geringem Durchströmwiderstand wird stärker als die übrigen Chargen durchströmt und stellt ein Bereich im Haufwerk mit erhöhter Belüftungsintensität dar. Bei heterogenen Haufwerken tritt der Effekt in verschiedenen Bereichen auf und lässt sich definieren als:

- Stochastisch auftretende Vorzugsströmung

Beim Vorliegen nur eines Belüftungsraumes unter dem Haufwerk ist es irrelevant, ob das jeweilige Material als ein großes zusammenhängendes Volumenelement existiert und damit nur eine Anströmfläche besitzt, oder ob eine Vielzahl kleiner Anströmflächen vorhanden ist. In jedem Fall bildet sich ein heterogenes Strömungsfeld im Reaktor heraus, wie es die Abbildung anhand der Strömungslinien verdeutlicht.

Die Ausprägung des heterogenen Strömungsfeldes beruht auf den Unterschieden im Durchströmwiderstand der Haufwerksbereiche. In Analogie zur Modellvorstellung in der Elektrotechnik stellt die Situation eine Parallelschaltung von Widerständen dar, wobei die Druckdifferenz über dem Haufwerk als Potentialdifferenz wirkt. Die verschiedenen Widerstände führen zu unterschiedlichen Volumenströmen in den Haufwerksbereichen. Die Widerstände lassen sich darstellen, wenn der spezifische Durchströmwiderstand mit der Schütthöhe H des Haufwerksbereiches multipliziert wird. Für den Volumenstrom im Bereich 1 resultiert:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = R_{L1} H \frac{\dot{V}_1}{A_1} = R_{L2} H \frac{\dot{V}_2}{A_2} \quad (6-1)$$

$$\dot{V}_1 = \frac{R_{L2} A_1}{R_{L1} A_2} \dot{V}_2 \quad (6-2)$$

Das Flächenverhältnis entfällt für die Annahme, dass beide Stoffsysteme jeweils die Hälfte des Reaktors einnehmen. Die Abb. 6-3 (S. 71) verdeutlichte das Spektrum an spezifischen Durchströmwiderständen verschiedener Chargen Rottegut. Werden Größenordnungen für

die Charge 1 von $R_{L1} = 6.000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ und ein Wert von $12.000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ für R_{L2} der Charge 2 angenommen, ist der Volumenstrom durch Bereich 1 doppelt so groß wie bei Bereich 2. Obwohl der Bereich 2 die Hälfte des Haufwerksvolumens einnimmt, wird dieser nur von einem Drittel der insgesamt das Haufwerk anströmenden Luft durchströmt. Der Einfluss der Böschung auf die Durchströmung ist Inhalt von Kapitel 6.3.5 (S. 89 ff.) und bleibt zunächst unberücksichtigt.

Um die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten zu diskutieren, muss zunächst die Wirkung einer Durchströmung betrachtet werden. Die Mechanismen sind aus biochemischer, thermodynamischer und strömungsmechanischer Sicht relevant. Sie führen aufgrund des Luftstroms entweder direkt zu Effekten, oder sind Folge von Begleiterscheinungen und stellen somit indirekte Effekte dar. Anhand der bisherigen Überlegungen lassen sich folgende prozessrelevante Effekte ableiten:

- Versorgung des Haufwerks mit Luftsauerstoff und Abfuhr von Stoffwechselprodukten
- Wärmeabfuhr durch Lufterwärmung und Verdunstungskühlung
- Austrag von Wasser durch die Verdunstung von Flüssigkeit

Die ersten beiden Aspekte sind Vorgaben der aeroben Prozessführung und der dritte Punkt eine unvermeidliche Begleiterscheinung. Selbst bei einem homogenen Strömungsfeld im Reaktor sind damit negative Auswirkungen verbunden, wie sie als Problemanalyse des realen Reaktors diskutiert wurden (vgl. 3.2, S. 20 ff.). Bei einem ungleichen Strömungsfeld treten weitaus gravierendere Effekte für das Betriebsverhalten ein. Liegen Chargen unterschiedlicher Durchströmbarkeit nebeneinander vor, lässt sich dies mit einer Parallelschaltung einzelner Widerstände vergleichen. Die Folge wurde beschrieben, dass bei einer Durchströmung der größte Strom durch die Bereiche mit dem geringsten Widerstand fließt. Die Zustände bleiben normalerweise während der gesamten Durchströmungsdauer erhalten. Bei Rotteguthaufwerken kommen zwei wesentliche Aspekte hinzu:

- Austrocknung der stark durchströmten Bereiche
- Bildung von flüssigen biochemischen Stoffwechselprodukten (z.B. Wasser), welche in schwach durchströmten Bereichen nicht oder nur wenig ausgetragen werden

Der erste Aspekt führt vor allem bei saugfähigen nativ-organischen Komponenten zu einer Schrumpfung, in deren Folge der spezifische Durchströmwiderstand in diesen Bereichen sinkt. Die Belüftungsintensität der stark durchströmten Bereiche erhöht sich weiter. Der zweite Aspekt führt zu einer Vergrößerung des ohnehin schon erhöhten Durchströmwiderstandes der schwach durchströmten Bereiche, weil sich Poren mit Flüssigkeit füllen. Trotz möglicherweise erfüllter Sauerstoffversorgung kann die Durchströmung zur Wärmeabfuhr in diesen Bereichen zu gering sein und zu einer Limitierung aerober Stoffwechselvorgänge führen (vgl. Abb. 6-11, S. 76). Es können sich Bereiche ausbilden, die praktisch nicht mehr am Prozess teilnehmen.

Die theoretisch analysierten Wirkungen einer Heterogenität im Haufwerk müssen sich auch empirisch beim Betriebsverhalten nachweisen lassen. Ein Nachweis ist durch die örtlichen Temperaturen und Gaszusammensetzungen im Haufwerk möglich. Die Abb. 6-18 zeigt ein Beispiel.

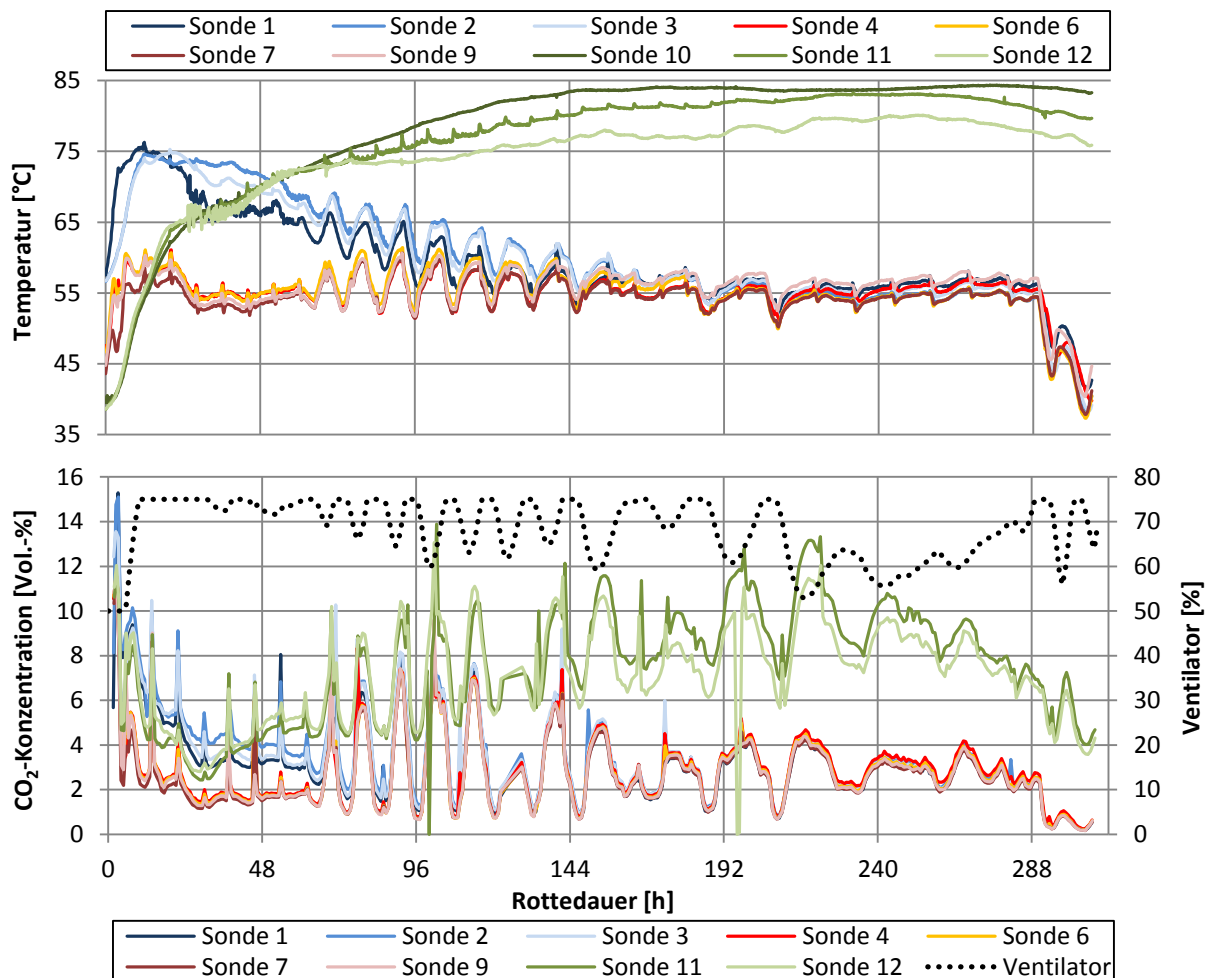


Abb. 6-18: Heterogenität im Reaktor durch Material abweichender Rotteschritte (GA 11)

Das Betriebsverhalten wird im oberen Diagramm durch die örtliche Temperatur an Messstellen im Haufwerk charakterisiert (vgl. Abb. 5-18, S. 65). Das untere Diagramm zeigt zeitlich kongruent die an diesen Messstellen ermittelte CO₂-Konzentration. Die Temperatur erhöht sich von einem jeweils vergleichbaren Niveau unterschiedlich stark. Am hinteren Ende des Tunnels (Messstellen 1 bis 3) und in der Mitte steigt sie steil an, am Tunnelort (Messstellen 10 bis 12) langsamer. Am Tunnelort tritt mit maximalen Werten um teilweise über 80 °C auch ein deutlich höheres Niveau auf. Die übrigen Stellen erreichen maximale Werte von 75 °C (Tunnelende) und 60 °C (Tunnelmitte) und kühlen sich anschließend auf 55 °C ab. Auch die CO₂-Konzentrationen sind an den Stellen am Tunnelort mit etwa 9 Vol.-% signifikant höher als in den übrigen Bereichen mit 3 Vol.-%.

Das stark abweichende Betriebsverhalten der hinteren und mittleren Haufwerksbereiche vom vorderen Bereich lässt sich wie folgt erklären. Der Reaktor befindet sich im zweiten Rotteschritt und enthält demnach Umtragsmaterial (Umtrag). Durch die Volumenverringering des Materials im ersten Rotteschritt, dem Rotteverlust, wurde der Tunnel auf der Torseite jedoch mit frischem Material (Eintrag) aufgefüllt. Eine interne, nicht veröffentlichte Auswertung von Daten der MBA-Anlage A zeigte, dass sich die Masse trotz der Bewässerung bei 91 % der Inputmassen um 20 bis 40 % verringerte [Brummack & Kießling, 2009]. Ähnliche Größenordnungen sind beim Volumen zu erwarten, so dass das Eintragsmaterial großräumig auf der Torseite vorliegen muss.

Mögliche Ursachen für das abweichende Betriebsverhalten von Eintrag und Umtrag sind:

- Höhere Wärmeproduktion von Eintrag („frisches“ Rottegut) im Vergleich zu Umtrag
- Unterschiedliche Durchströmbarkeit beider Stoffsysteme
- Kombination beider Ursachen

Eine erhöhte Wärmeproduktion ist ein möglicher Effekt aus dem Abbau der leicht abbaubaren Komponenten. Die Auswertung der Anlagenbetriebsdaten bzgl. der Belüftungsintensität und die Untersuchungen zur Gaszusammensetzung zeigten hierfür jedoch keine eindeutigen Kennzeichen. Eine wahrscheinliche Erklärung für das Betriebsverhalten ist eine Kombination mit der Durchströmbarkeit als zweite mögliche Ursache. Die Abb. 6-3 (S. 71) zeigte, dass der spezifische Durchströmwiderstand von Eintragsmaterial über dem von Umtragsmaterial liegt. Eintragsmaterial wird folglich schwächer durchströmt und erwärmt sich stärker. Auch ein erhöhter Frischlufteinsatz am Prozessende ist unter diesen Umständen für eine wirkungsvolle Wärmeabfuhr nicht ausreichend. Die CO_2 -Konzentration macht deutlich, dass eine Erhöhung der Belüftungsintensität (ersichtlich anhand der Ventilatorleistung) zu geringeren Werten an allen Messstellen führt und somit eine Durchströmbarkeit gegeben ist. Jedoch bleiben die Werte im Eintragsmaterial aufgrund der schwächeren Durchströmung stets größer.

Eine mögliche Ursache für das abweichende Verhalten im hinteren Haufwerksbereich ist die Art der Reaktorbeschickung. Diese führt dazu, dass die Liegedauer des Rottegutes am Reaktorende am größten ist und sich der Bereich vor Prozessbeginn am meisten erwärmt. Eine weitere Möglichkeit ist ein gehemmter Rotteprozess im ersten Rotteschritt, beispielsweise durch einen zu hohen Wassergehalt. Erst durch die Materialumsetzung werden die Bedingungen für den Prozess verbessert, wodurch sich die Wärmefreisetzung erhöht. Zur Bewertung wären Informationen zum Verhalten im ersten Rotteschritt notwendig.

Die beschriebenen Effekte im vorderen Haufwerksbereich wurden durch das Vorliegen von Material unterschiedlicher Rotteschritte verursacht. Effekte können auch im Inneren des Haufwerks und damit bei Material des gleichen Rotteschritts auftreten. Die Abb. 6-19 zeigt eine Situation anhand der örtlichen Temperaturen und wichtiger Betriebsdaten.

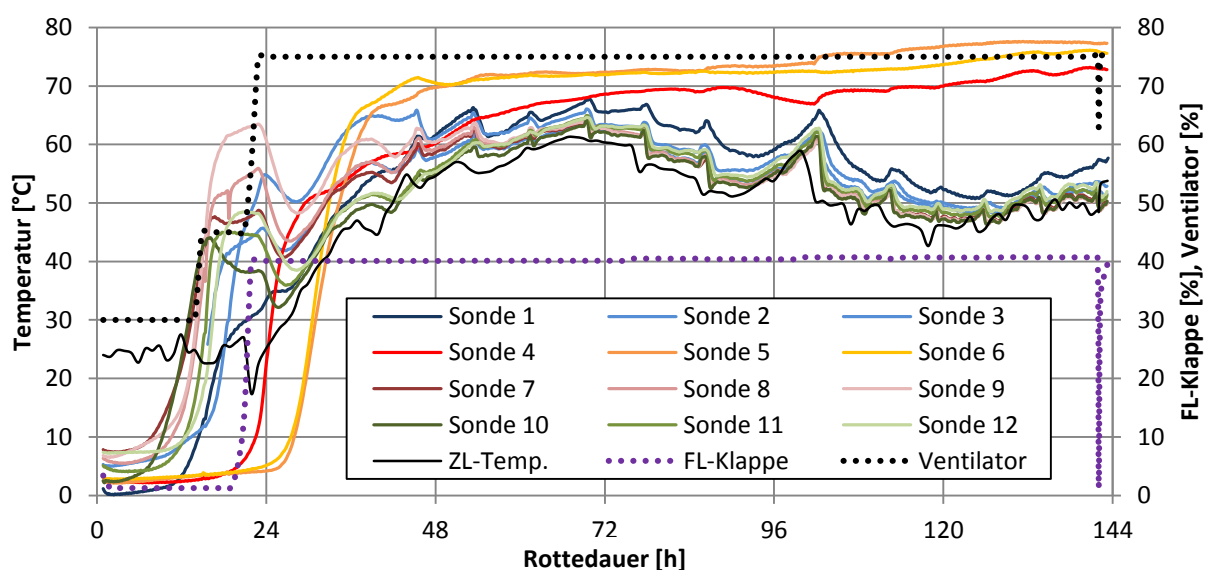


Abb. 6-19: Heterogenität im Reaktor durch Material abweichender Eigenschaften (TM 13, 1.)

Bereits in der Startphase liegen große Unterschiede in den Temperaturen vor. Die Messstellen 4 bis 6 weisen in der Startphase und in der Hauptrottephase untereinander ein ähnliches Verhalten auf, welches sich von dem der übrigen Stellen aber stark unterscheidet. Es kommt zu einer stetigen Temperaturerhöhung, während sich die übrigen Bereiche ab Mitte der Rottedauer stetig abkühlen. Das Verhalten ist die Folge einer segmentweisen Einlagerung von Rottegut abweichender Eigenschaften in den Reaktor.

Die Erläuterungen haben gezeigt, dass sich eine Heterogenität im Haufwerk im Betriebsverhalten des Reaktors widerspiegelt. Die analysierten Wirkungen einer Haufwerksdurchströmung auf die Temperatur und den Wassergehalt verdeutlichten, dass sich besonders eine Heterogenität in der Durchströmbarkeit negativ auf das Betriebsverhalten auswirkt. Derartige Unterschiede verstärken sich im Betrieb und führen zur Verstärkung oder zur Ausbildung von Unterschieden in weiteren physikalischen Eigenschaften des Rottegutes und damit auch zu einer Heterogenität im biologischen Prozess und in der Prozessgeschwindigkeit.

6.3.4 Randgängigkeit

Die Durchströmung des Haufwerks wird neben der stoffsystembedingten Heterogenität (verschiedene Chargen) auch durch die aus verfahrenstechnischen Apparaten bekannte Randgängigkeit beeinflusst. Die Randgängigkeit kann auf zwei Aspekten beruhen:

- Störung der Strukturausbildung an den Wänden
- Separierung von Komponenten bei der Reaktorbeschickung (vgl. Abb. 6-16, S. 81)

Einfluss auf das Ausmaß des ersten Aspektes hat die Partikelgrößenverteilung, die dominierende Fraktion und die Partikelform. Als Kriterium wird häufig die vorliegende Partikelgröße in Bezug zur Dimension des Apparates gesetzt. Bei Korngrößen bis maximal 70 mm, einer Reaktorbreite von 5.000 mm und einem Größenverhältnis von über 71 erscheint dieses Kriterium bei der Behandlung von Rottegut unkritisch. Größere Wirkungen treten nur für Verhältnisse kleiner 10 auf (vgl. 4.1.1, S. 23). Die Aussagen gelten aber speziell für kugelförmige und ähnliche Teile. Bei Rotteprozessen treten andere Formen und Stoffsysteme mit einer Vielzahl an wechselwirkenden Komponenten auf. Eine mögliche Intensivierung der Wirkungen ist durch die zufällige Bildung von Sekundärpartikeln und die Verdrillung flächiger Komponenten auf den Transportbändern möglich.

Eine signifikante Verstärkung der Wirkungen tritt durch die technologiebedingte Besonderheit der Reaktorbeschickung als zweiten Aspekt ein. Randgängigkeit ist bei Anlagen bedeutungsvoll, bei denen die Beschickung mit Bandsystemen und speziell mit Schleuderbändern erfolgt. Beim Abwurf des Rottegutes vom Band erfolgt eine Separierung von Komponenten und es kommt zur Ausbildung sich entwickelnder Schüttkegel entlang der Quer- und Längsrichtung des Reaktors (vgl. Abb. 6-15, S. 81). Roll- und gleitfähige Teile des Stoffsystems lagern sich am Boden und an den Wänden des Rottereaktors ab, was zu einer größeren Porosität in diesen Bereichen im Vergleich zum übrigen Haufwerk führt. Die Durchströmbarkeit dieser Bereiche ist besser als im übrigen Haufwerk. Es ergeben sich Auswirkungen auf die Durchströmung, wie sie bereits bei der Heterogenität im Haufwerk diskutiert wurden.

Die als Störung in der Haufwerksstruktur interpretierbaren Bereiche erhöhter Porosität nehmen relevante Größenordnungen an. Wie die Abb. 6-20 im Quer- und Längsschnitt eines Rottereaktors zeigt, lassen sich zwei Randgängigkeitszonen definieren:

- Zone 1 an beiden Reaktorwänden als Folge des seitlichen Abrollens vom Schüttkegel
- Zone 2 am Reaktorboden als Folge des Abrollens nach vorn in der Längsrichtung

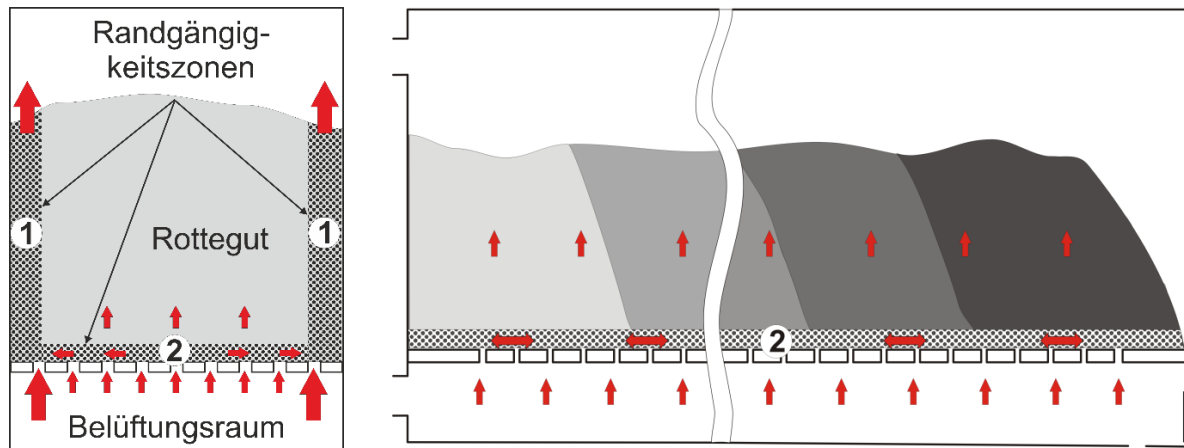


Abb. 6-20: Randgängigkeit im Rottereaktor (links: Querschnitt, rechts: Längsschnitt)

Die Randgängigkeitszonen weisen einen geringeren Durchströmwiderstand als die übrigen Haufwerksbereiche auf. Die Randgängigkeit betrifft nur bestimmte Bereiche, so dass sich die Effekte definieren lassen als:

- Systematisch auftretende Vorzugsströmung

Die Zone 1 bewirkt, dass Luft aus dem Belüftungsraum direkt in die Wandbereiche gelangt und den übrigen Bereichen nicht zur Verfügung steht (große rote Pfeile). Die Zone 2 bewirkt zusätzlich eine Verteilung der Luft entlang des Belüftungsbodens, weil das darüber liegende Material einen größeren spezifischen Durchströmwiderstand aufweist. Verstärkt wird dieser Effekt dadurch, dass das Luftporenvolumen im Haufwerk grundsätzlich Richtung Boden abnimmt. Im Rottereaktor führt die Verteilung am Boden theoretisch zu einer gleichmäßigen Anströmung des Haufwerkes, z.B. bei verstopften Belüftungslöchern. Die positive Wirkung wird jedoch durch negative Effekte überdeckt. Wie die Abbildung links anhand der kleinen horizontalen Pfeile zeigt, kommt es über der Reaktorbreite zu einer teilweisen Orientierung der Luft in Richtung der Randbereiche und damit zu einer Intensivierung der Vorzugsströmung an den Wänden. Im Kapitel 6.3.5 (S. 89 ff.) ist der Einfluss der Luftverteilung über der Reaktorlänge zu diskutieren.

Die Randgängigkeitszonen bleiben über die Rottedauer bestehen. Setzungserscheinungen führen zu keinen Abschwächungen, weil die Zonen aufgrund der enthaltenen Komponenten meist weniger stark als die übrigen Haufwerksbereiche komprimiert werden. Bei den Komponenten handelt es sich um Vollkörper (mechanisch stabil) und um verdillte flächige Komponenten wie Folien (begrenzt verformbar). Die Verdichtung an den Rändern ist dabei geringer als am Boden. Der Grund ist das Horizontallastverhältnis (Horizontal- zu Vertikalspannung), das bei Schüttungen nur zwischen 0,3 und 0,6 liegt [Schulze, 2009]. Vielmehr kommt es zu einer Ausweitung der Wirkungen der Zonen, weil die stärker durchströmten Bereiche

austrocknen und sich die Durchströmbarkeit auch direkt angrenzender Bereiche hierdurch verbessert.

Ein Nachweis der Randgängigkeit ist aufgrund der Varianz der Haufwerkseigenschaften nur qualitativ möglich. Als experimentelle Lösung wurden in Untersuchungen im Vorfeld der vorliegenden Arbeit Schläuche in das Haufwerk eingebracht, um manuell die Gaszusammensetzung zu bestimmen. Die Schläuche wurden in einem ersten Versuch direkt an der Tunnelwand und im Kern des Haufwerks in jeweils drei verschiedenen Höhen sowie zusätzlich im Belüftungs- und Abluftraum installiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Gaszusammensetzung an den Wänden annähernd der Zusammensetzung der Zuluft entsprach.

In einem zweiten Versuch wurden Schläuche zwischen Wand und Stecherthermometer sowie etwa 40 cm von der Wand entfernt und jeweils in zwei Höhen eingebracht. Die Ergebnisse aus der Abb. A-3 im Anhang (S. 174) zeigen, dass die CO_2 -Konzentration in den Randbereichen (0,5 Vol.-%) bedeutend niedriger als im Haufwerkskern (3 Vol.-%) lag und an den äußeren Messstellen in der Zusammensetzung selbst noch 0,9 m über dem Belüftungsboden derjenigen der Zuluft (0 Vol.-%) entsprach. Damit ist eine übermäßige Durchströmung der Randbereiche, d.h. eine stark ausgeprägte Randgängigkeit, nachgewiesen.

6.3.5 Böschungen

Schüttungen laufen in statischen Rottereaktoren an den Enden häufig über Böschungen mit natürlichem Böschungswinkel aus. Die Abb. 6-21 zeigt dies rechts für das Beispiel der Torseite. Der Schüttwinkel liegt bei etwa 50° , so dass bei einer Schütthöhe von 2,30 m etwa eine Längenausdehnung am Boden von 2 m resultiert. Die Böschung an der Ventilatorseite des Reaktors stützt sich mitunter an der Rückwand ab und weist an der MBA-Anlage A eine andere Geometrie mit einer Ausdehnung von etwa 1,5 m auf (siehe Abb. 6-21 links).

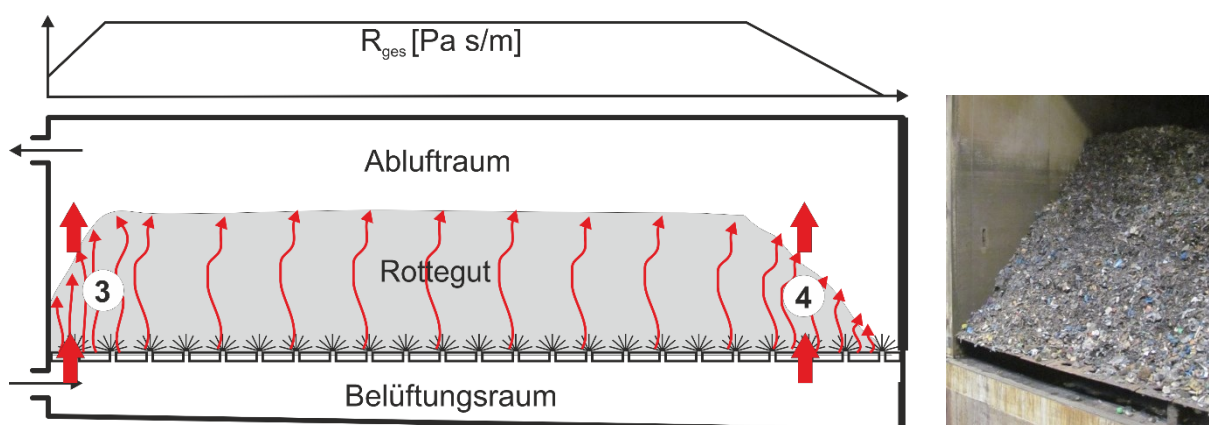


Abb. 6-21: Böschungen im Rottunnel: Einfluss auf die Haufwerksdurchströmung mit qualitativen Verlauf des Durchströmwiderstandes (links) und Beispiel am Tunneltor (rechts)

Böschungen haben Auswirkungen auf die Durchströmung des gesamten Haufwerks. Reichen die Belüftungseinrichtungen über die gesamte Bodenlänge und damit bis in die Bereiche des Böschungswinkels hinein, werden die Böschungen stärker als andere Bereiche des Haufwerks durchströmt. Ursache ist die nahezu lineare Abhängigkeit des Durchströmwider-

standes von der Schütthöhe des Materials (vgl. Abb. 5-13, S. 61). Es bildet sich im Reaktor ein ungleichmäßiges Strömungsfeld heraus, so dass weitere Randgängigkeitszonen definiert werden können. Diese sind in der Abb. 6-21 als Nr. 3 und Nr. 4 dargestellt. Obwohl es sich nicht um die aus der Verfahrenstechnik bekannte Randgängigkeit handelt, wird aufgrund der vergleichbaren Effekte ebenfalls auf diese Begrifflichkeit zurückgegriffen. Die Zonen sind:

- Zone 3 auf der Ventilatorseite
- Zone 4 auf der Torseite des Rotterektors

Die Durchströmung dieser Zonen lässt sich als weitere systematische Vorzugsströmung definieren. Die negativen Auswirkungen einer Vorzugsströmung auf das Gesamtsystem wurden diskutiert. Verstärkt werden die Auswirkungen durch das Vorliegen der Randgängigkeitszone 2 am Belüftungsboden. Die Zone endet auf der Torseite offen im Abluftraum und bewirkt einen geringen Durchströmwiderstand. Dadurch wird längs entlang des Belüftungsbodens strömende Luft bevorzugt in Richtung Tunnelor transportiert. Die Abb. 6-22 macht anhand der roten Pfeile deutlich, dass Luft direkt oder nach vertikaler Durchströmung der Randgängigkeitszone 4 in den Abluftraum des Reaktors austritt und nicht den Haufwerkskern erreicht. Aufgrund der hohen Belüftungsintensität und der kleinen Austrittsöffnung der Zone 2 zum Abluftraum tritt dennoch eine Durchströmung des Kerns ein.

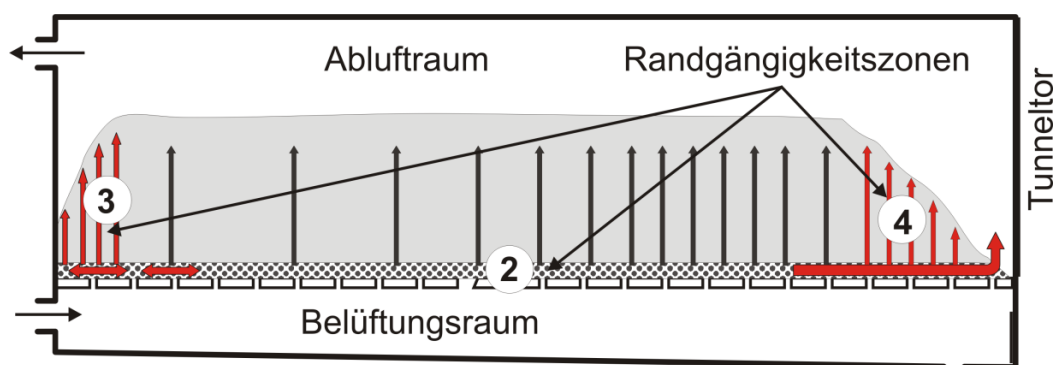


Abb. 6-22: Böschungen im Rottetunnel: Einfluss der Randgängigkeitszone am Boden auf die Haufwerksdurchströmung

Die Intensität der Haufwerksdurchströmung muss von der Ventilator- in Richtung Torseite zunehmen, wie es die Dichte der schwarzen Pfeile in der Abb. 6-22 schematisch zeigt. Auf der Torseite liegt der niedrigste Durchströmwiderstand vor (Böschung und Ende der Randgängigkeitszone 2), so dass eine gerichtete Strömung in Richtung Tor erfolgt. Eine effektive Belüftung der Haufwerksbereiche ist möglich, weil immer ausreichend frische Luft vorhanden ist. Auf der Ventilatorseite gibt es dagegen unklare Verhältnisse. Es existiert eine Triebkraft in Richtung Wand infolge der Böschung (Zone 3). Andererseits tritt Luft aus dem Belüftungsraum in die Bodenzone ein und ist der Triebkraft in Richtung Zone 4 ausgesetzt, so dass die Strömung in Summe vermutlich ungerichtet sein wird (rote Doppelpfeile am Boden). Eine effektive Belüftung der darüber liegenden Haufwerksbereiche wird dadurch erschwert. Eine Verifizierung der qualitativ beschriebenen Phänomene in der Randgängigkeitszone 2 ist nicht möglich, weil lokale Geschwindigkeiten nicht bestimmt werden können.

Nach theoretischer Betrachtung müssen die Böschungen das Betriebsverhalten negativ beeinflussen. Zum Nachweis wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt und die Be-

einflussung bewiesen. Für die MBA-Anlage A wurde anhand der Betriebsdaten aus dem Jahr 2009 überprüft, ob sich bei den Temperaturen der Stecherthermometer Effekte zeigen, obwohl der Stecher 3 etwa 4 m und der Stecher 1 etwa 4,5 m vom oberen Ende der Böschungswinkel entfernt platziert ist. Hierzu wurden alle Rottedurchgänge ausgewertet, indem für jedes Stecherthermometer der Median der Temperaturen ermittelt wurde. Der Vorteil des Median ist die geringe Beeinflussung durch Extremwerte (Ausreißer). Die Ergebnisse in der Abb. A-4 (S. 174) verdeutlichen, dass der Median von Stecher 3 am Tunneltor mit 56,0 °C am niedrigsten liegt. Der Stecher 2 zeigt mit 56,6 °C den mittleren und Stecher 1 auf der Ventilatorseite mit 57,7 °C den höchsten Wert. Das Temperaturprofil bestätigt die oben beschriebenen Phänomene zum Strömungsfeld über der Reaktorlänge.

Im Vorfeld der vorliegenden Arbeit wurde in einem Versuch die Umluftleitung an einem Rotteraktor ausgebaut und der Abzweig zur Frischluftsammeleleitung getrennt. Dadurch wurde ein Betrieb mit reiner Frischluft ermöglicht. Aufgrund des hohen Wasseraufnahmevermögens von Frischluft können die Effekte eines ungleichen Strömungsfeldes schnell aufgedeckt werden. Das Betriebsverhalten wurde anhand der Betriebsdaten des Reaktors und durch Messungen mit batteriebetriebenen Temperaturdatenloggern im Haufwerk bewertet. Die Ergebnisse sind in der Abb. 6-23 anhand der Betriebsdaten dargestellt.

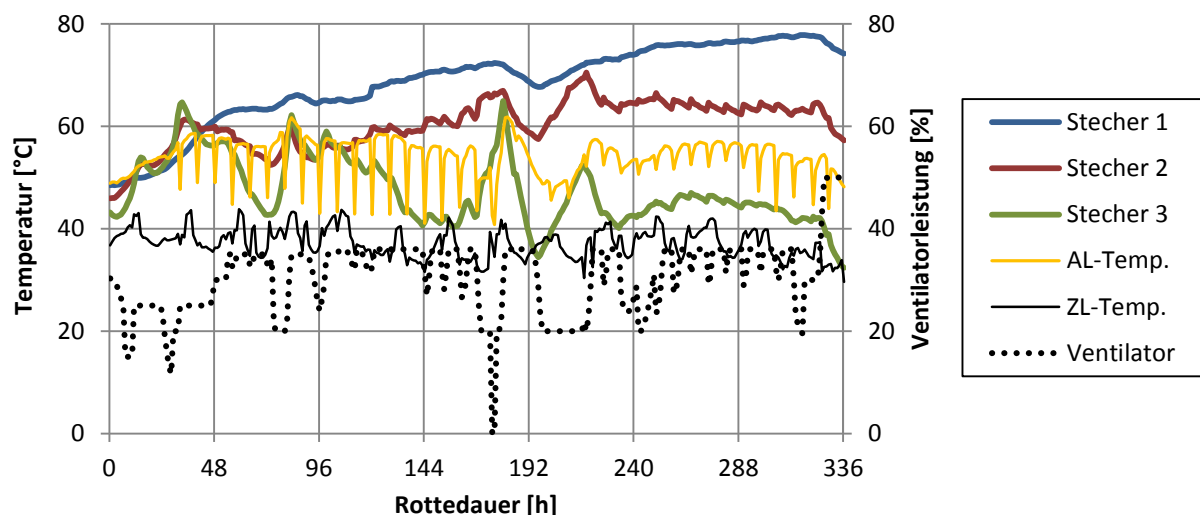


Abb. 6-23: Einfluss von Böschungen auf das Temperaturfeld im Reaktor (Versuch ausgebaute Umluftleitung)

Nach einer einheitlichen Erwärmung beginnen nach etwa 48 h die drei Temperaturkurven der Stecherthermometer auseinanderzudriften. Der Bereich um den Stecher 1 erwärmt sich weiter und der um den Stecher 3 kühlt sich kontinuierlich ab. Bei einer Ventilatorabschaltung nach 176 h zeigt sich ein Effekt, der die Interpretation der Vorgänge ermöglicht. Der Bereich um den Stecher 3 erfährt einen kräftigen Temperaturanstieg. Diese Erscheinung kann nur auftreten, wenn sich der Rotteprozess in einer Phase mit hohem Stoffumsatz befindet und die freigesetzte Wärme durch eine Belüftung ausgetragen wird. Aufgrund der Böschung ist die Belüftungsintensität am Stecher 3 am größten. Erst durch Abschaltung des Ventilators steigt die Temperatur an, weil die Wärmebilanz positiv wird. Nach der Zuschaltung des Ventilators muss die Temperatur wieder abnehmen, da das System in den vorhergehenden Zustand zurückkehrt. Der Bereich um den Stecher 2 ändert sein Verhalten beim Abschalten

und auch bei der Wiederinbetriebnahme des Ventilators deutlich weniger und der Bereich um den Stecher 1 sogar kaum. Dieses anormale Betriebsverhalten wird nicht durch Unterschiede in den Starteigenschaften des Rottegutes verursacht, sondern muss Folge einer vom Beginn des Prozesses an stärkeren Haufwerksdurchströmung an der Torseite sein.

Die möglichen Kennzeichen stark durchströmter Bereiche werden auch im ersten Rotteschritt der Abb. 6-26 (S. 95, links) sichtbar. Die örtlichen Temperaturen der an der Torseite platzierten Messsonden 10 bis 12 zeigen ein im Allgemeinen niedrigeres Niveau als die übrigen Messsonden und ausgeprägte Amplituden im Fall veränderter Belüftungsintensität.

6.3.6 Wirkung einer Materialumsetzung

In den Ablauf von Rotteprozessen ist eine ein- oder mehrmalige Materialumsetzung fest integriert. Der Begriff beschreibt eine Umlagerung des Rottegutes in einen anderen Rottreaktor mit Radladern oder speziellen automatisierten Aggregaten. Die Notwendigkeit einer Materialumsetzung begründet sich aus der Spezifikation des Stoffsystems und dem Verhalten während des Rotteprozesses:

- Heterogenität im Haufwerk zu Prozessbeginn
- Strukturveränderungen durch Setzung und biochemische Prozesse
- Beeinflussung durch Belüftung

Im Rotteprozess werden sich bestehende Ungleichheiten verstärken und nur zufällig ausgleichen sowie neue Ungleichheiten bilden. Ursache ist im Wesentlichen die Wirkung der Durchströmung auf die Temperatur und den Wassergehalt im Haufwerk als Einflussgröße auf die biologische Aktivität und Prozessgeschwindigkeit. In einer zwangsbelüfteten, ruhenden Schüttung mit biologischer Wärmeproduktion wird ein durch Temperaturunterschiede hervorgerufenen, selbstregulierendes Verhalten der Rotteprozesse verhindert. Die freie Konvektion wird durch die technisch intensivierte Belüftung überlagert.

Aufgrund der Wirkungen der Belüftung und der biochemischen Prozesse auf das Stoffsystem müssen im Betrieb folgende Effekte auftreten:

- Ausweitung primärer Gradienten
- Ausbildung sekundärer Gradienten

Primäre Gradienten aus dem Prozessbeginn sind durch das Stoffsystem vorgegeben. Prozesstechnisch relevant sind besonders Gradienten bzgl. der Durchströmbarkeit, weil sie zu stochastisch oder systematisch auftretenden Vorzugsströmungen mit den diskutierten Effekten führen. Sekundäre Gradienten beruhen allgemein auf der Belüftung und bilden sich stets aus. Wesentliche Merkmale sind eine Austrocknung und Kühlung der angeströmten Bodenzonen im Haufwerk mit zunehmender Fortsetzung in größere Höhen.

Die Effekte lassen sich messtechnisch nachweisen. Einen offensichtlichen Fall zeigt die Abb. 6-24 anhand der örtlichen Temperaturen in einem ersten Rotteschritt. Beginnend von unterschiedlichen Starttemperaturen erhöhen sich die Werte in den ersten 12 h auf 50 bis 55 °C. Anschließend kommt es teilweise zu einer weiteren Steigerung und teilweise zu ei-

nem Temperaturrückgang. Ab etwa 48 h führt dies zu einem signifikanten Auseinanderdriften der Werte und zu einer Ausweitung der Temperaturunterschiede auf bis zu 45 K.

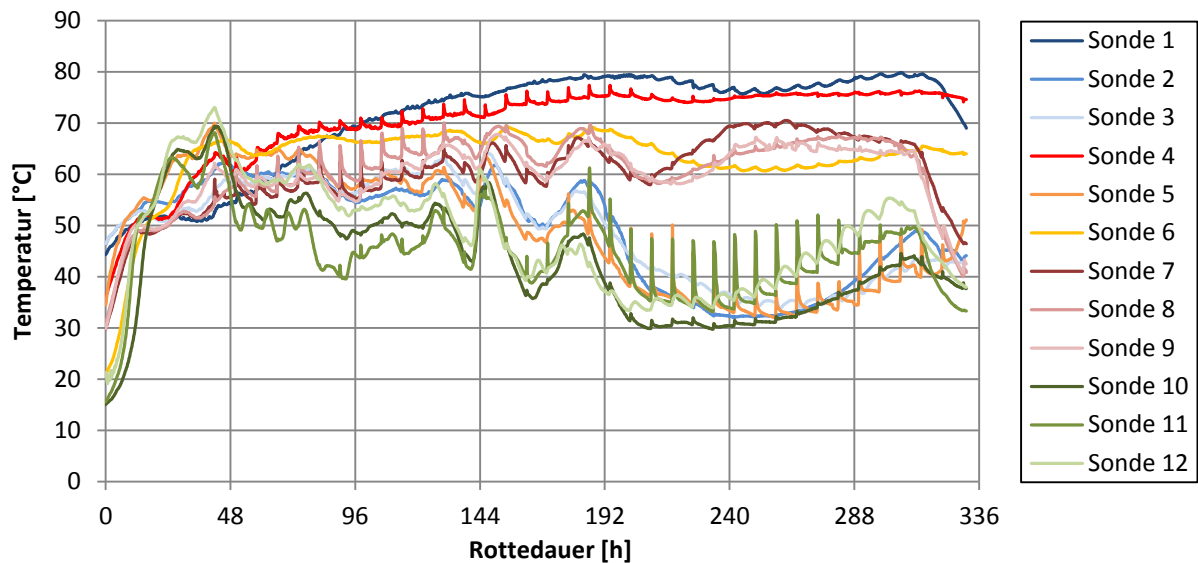


Abb. 6-24: Heterogenität im Prozessverlauf (GA 6)

Der Grad und die Veränderung der Heterogenität im Prozess sind bei jeder Rotte verschieden. Das Spektrum reichte von einer starken Ausprägung wie in der Abb. 6-24, bis zu einer geringen Ausprägung wie in der Abb. 8-12 (S. 145). Prinzipiell wurde stets eine Ausweitung der Unterschiede zwischen örtlichen Temperaturen festgestellt. Dies erfolgte auch dann, wenn in der Anfangsphase einheitliche Bedingungen erfasst wurden. Gründe für eine gering ausgeprägte Heterogenität sind eine einheitlich gute Rottefähigkeit des Stoffsystems, jedoch ebenso die Messtechnik. So wird das Verhalten der Haufwerksbereiche zwischen Boden und Messposition nicht überwacht, weshalb Gradienten verborgen bleiben können. Allgemeine Aussagen zum Zeitpunkt, ab welchem sie messtechnisch erfasst werden, sind auch deshalb nicht möglich.

Obwohl gegensätzliche Aspekte zur Ausweitung von Gradienten physikalisch ausgeschlossen sind, wurde in manchen Situationen eine vermeintliche Verringerung beobachtet. Mögliche Ursachen sind:

- Unterschiedliche biologische Aktivitäten bewirken abweichende Erwärmungen
- Verringerung der biologischen Aktivität durch zu hohe Temperaturen
- Überlagerung anfangs bestehender stochastisch auftretender Vorzugsströmungswege durch die Wirkung stärker ausgebildeter Wege

Es handelt sich um Möglichkeiten, die aus biochemischer, wärme- und strömungstechnischer Sicht plausibel sind. Sie können nicht als typisch für jeden Rotteprozess angesehen werden und verhindern die grundlegenden Mechanismen einer Bildung und Verstärkung von Gradienten nicht. Bei der ersten Ursache führt eine übermäßige Temperatursteigerung von Bereichen zur Ausbildung der Heterogenität, welche durch das langsame Nachziehen anderer Stellen wieder abgebaut wird. Die Abb. 6-24 zeigt ein solches Verhalten am Anfang bei den Stellen 10 bis 12. Bei der zweiten Ursache kann sich als Folge zu hoher Temperaturen die Wärmefreisetzung lokal vermindern und sich die Situation in diesen Bereichen längerfris-

tig den übrigen kühleren Bereichen angleichen. Bei der dritten Ursache wird die Belüftung durch eine unterschiedlich stark ausgebildete Materialsetzung oder durch den lokalen Verschluss von Luftporen durch Stoffwechselprodukte, Presswasser oder durch mobilisierte Feinanteile beeinflusst.

Die Ausführungen haben gezeigt, dass Gradienten über der Höhe, Breite und Länge des Haufwerks auftreten und die Wirkungen im Prozess negativ sind. Um die Zielstellung der Materialumsetzung für eine Rückvermischung zu erfüllen, müssen Gradienten in den drei Dimensionen abgebaut werden. Das Umsetzen beinhaltet folgende Schritte:

- Leerung des Reaktors
- Transport zum neuen Reaktor
- Beschickung des neuen Reaktors

Die wesentlichen Effekte müssen bei der Leerung eintreten. Der Transport hat für den erforderlichen großräumigen Abbau von Gradienten keine Relevanz. Bei der Beschickung erfolgt nur eine lokale Rückvermischung ohne Effekte auf eine großräumig vorliegende Heterogenität.

Die Leerung erfolgt stets umgekehrt zur Beschickungsrichtung. Bei Tunnelsystemen wird die Schüttung hierbei von vorn (Torseite) nach hinten in senkrecht stehenden Schichten (segmentweise) abgetragen. Durch den Eingriff erfolgt eine begrenzte Materialmischung, die beim Einsatz von Radladern abhängig von der Größe einer Laderschaufel ist. Bei Reaktoren mit Schubböden ist der wirkende Durchmesser der Kratzerwelle der Austragsmaschine relevant. In beiden Fällen werden Gradienten im Material innerhalb eines Segments der Länge von maximal 1 m abgebaut. Eine umfassende Rückvermischung über der Reaktorlänge ist nicht möglich. Die theoretischen Zusammenhänge sind in der Abb. 6-25 vereinfacht anhand weniger Chargen für den ersten (links) und für den zweiten Rotteschritt (rechts) dargestellt.

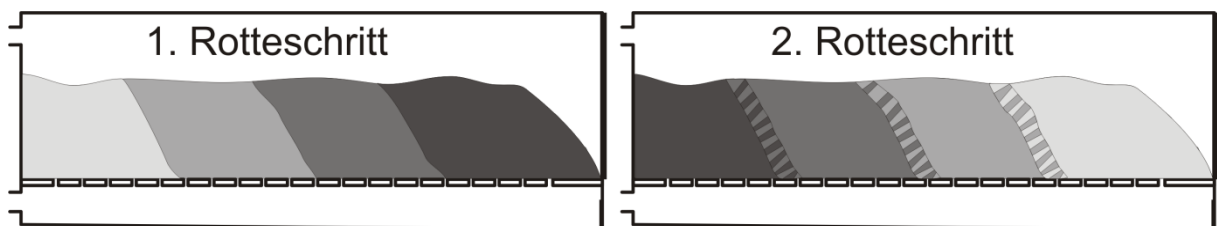


Abb. 6-25: Rottreaktor vor (links) und nach einer Materialumsetzung (rechts)

Daraus lassen sich die Effekte einer Materialumsetzung ableiten:

- Einlagerung der Chargen im zweiten Rotteschritt in umgekehrter Reihenfolge
- Glättung der Eigenschaften der Chargen nur an den Übergängen

Die segmentweise Anordnung der Chargen im Reaktor bleibt bestehen und stellt sich nur in umgekehrter Reihenfolge dar. Allein an den Übergängen erfolgt entsprechend des Wirkungskreises der Umsetzungstechnik eine Vermischung. Starke Gradienten über der Reaktorlänge im ersten Rotteschritt müssen sich zwangsläufig im zweiten Schritt zeigen. Dieser systematische Zusammenhang widerspricht dem Zweck einer Umsetzung und wirkt sich negativ auf das Betriebsverhalten aus. Die experimentellen Untersuchungen haben den Zu-

sammenhang bestätigt. Die Abb. 6-26 zeigt in einem Beispiel die Haufwerkstemperaturen im ersten (links) und zweiten Rotteschritt (rechts).

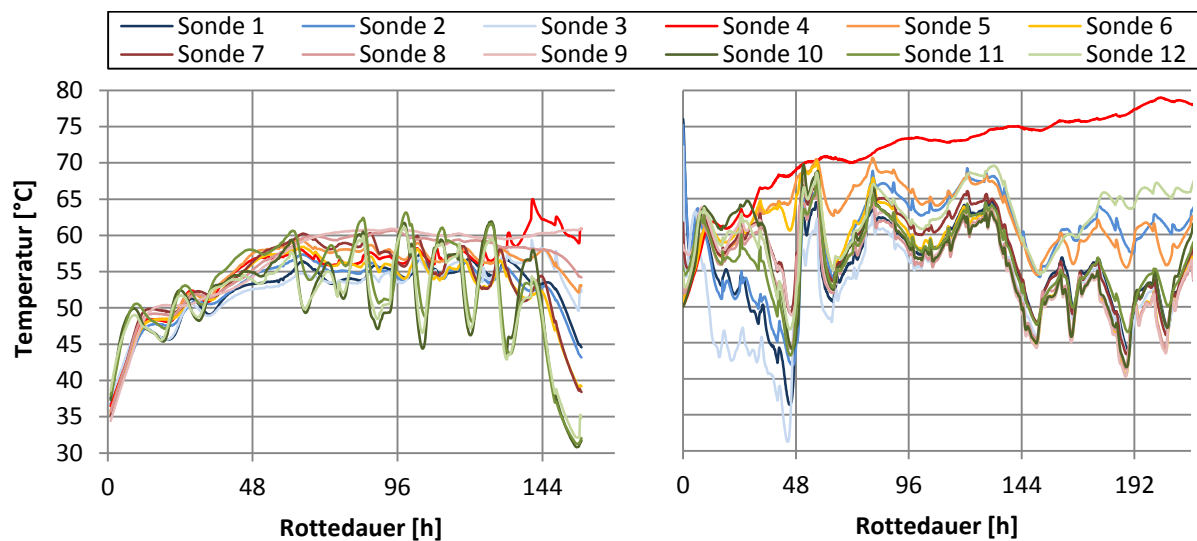


Abb. 6-26: Heterogenität vor (links) und nach einer Umsetzung (rechts) (TM 7)

Zum Ende des ersten Rotteschritts führt ein verstärkter Frischluftbetrieb und eine hohe Belüftungsintensität zu einer ausgeprägten Temperaturniedrigung auf der Torseite des Tunnels (Messsonden 10 bis 12). Das Material dieser Region wird bei der Umsetzung auf der Ventilatorseite eingetragen. Im zweiten Rotteschritt treten an dieser Stelle (Messsonden 1 bis 3) zum Prozessstart sehr hohe Temperaturen und im Anschluss eine starke Abkühlung auf. Das Material muss eine große Aktivität aufweisen, die im ersten Rotteschritt durch eine hohe Belüftungsintensität wärmetechnisch ausgeglichen wurde. Hierzu trugen ggf. eine Vorzugsströmung an der Böschung (vgl. Abb. 6-22, S. 90) und/oder eine bessere Durchströmbarkeit des Materials im Vergleich zu anderen Chargen bei. Aufgrund der resultierenden intensiven Belüftung im ersten Rotteschritt verbesserte sich die Durchströmbarkeit weiter. Diese Materialeigenschaft führte nach dem Umsetzen zur beschriebenen starken Wärmeabfuhr.

Haben sich im Prozess deutliche Gradienten im Haufwerk ausgebildet, bleiben diese nach der Umsetzung bestehen. Die Heterogenität zum Ende des ersten Rotteschritts zeigt sich in der Abb. 6-26 ebenso in den ersten 48 h des zweiten Schritts. Der starke Anstieg der Temperatur im Folgenden wurde durch einen sprunghaften Umluftbetrieb und eine reduzierte Belüftungsintensität hervorgerufen. Die Wärmeabfuhr wird stark vermindert, weshalb es durch angegliche Temperaturen auf hohem Niveau zu einer vermeintlichen Homogenität im Haufwerk kommt. Die Schwankungen im weiteren Fortgang sind Folge einer in Kapitel 7.2.2 (S. 111 ff.) zu diskutierenden Beeinflussung durch die Zuluft. Ein höherer Frischluftanteil führt gegen Ende wieder zur Registrierung der seit Anfang an bestehenden Gradienten.

In Untersuchungen wurde ein unterschiedliches Betriebsverhalten der durch die Umsetzung definierten Rotteschritte festgestellt. Starke Gradienten traten im zweiten Schritt seltener und angestrebte Zustände häufiger auf. Durch Auswertung der Anlagenbetriebsdaten konnten beide Zeiträume verglichen werden. Hierzu wurden Daten der einzelnen Rottedurchgänge der MBA-Anlage A aus dem Jahr 2010 bzgl. Niveau und Verlauf der Temperaturen der drei Stecherthermometer bewertet. Die Verläufe wurden anhand spezieller Merkmale (siehe

Tab. A-2, S. 176) in festgelegte Klassen (siehe Tab. A-3, S. 176) eingeteilt. Die Klassen wurden in fünf Kategorien gemäß Tab. 6-1 zusammengefasst.

Tab. 6-1: Merkmalsabhängige Einordnung der Stechertemperaturen in Kategorien

Kategorie	Beschreibung
S 1	Normale Temperaturverläufe (etwa 55°C, wenige Schwankungen)
S 2	Große Schwankungen über der Zeit, aber Temperaturen einander ähnlich
S 3	Alle drei Stechertemperaturen unterschiedlich
S 4	Eine Stechertemperatur deutlich abweichend
S 5	Sonstige Verläufe

In Kategorie 1 wurden Verläufe eingeordnet, die ein für den Rotteprozess angestrebtes Verhalten zeigen. Darunter sind einander ähnliche Temperaturen der Stecherthermometer und Werte in der Hauptrottephase von etwa 55 °C zu verstehen. Beispielhafte Zustände für die Kategorien sind in der Tab. A-4 (S. 177) hinterlegt. Verläufe wurden in Kategorie 2 eingruppiert, wenn die drei Temperaturen ähnlich sind, über der Rottedauer aber große Schwankungen im Verlauf auftreten. Weisen alle drei Thermometer unterschiedliche Größenordnungen und Werteverläufe auf, wurden sie der dritten Kategorie zugeordnet. Weicht ein Stecher deutlich von den anderen ab, gilt Kategorie 4. Alle übrigen Verläufe sind in Kategorie 5 enthalten. Die Abb. 6-27 zeigt die Auswertung anhand von drei Kreisdiagrammen für die Gesamtheit der Rottedurchgänge und für Material aus dem ersten und zweiten Rotteschritt.

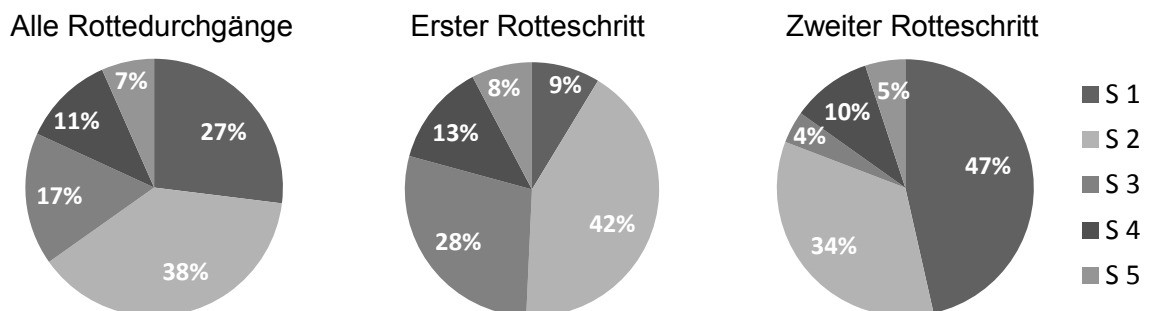


Abb. 6-27: Verteilung der den Verläufen zugeordneten Kategorien der Stechertemperatur

Nur 27 % aller Durchgänge zeigen ein angestrebtes Betriebsverhalten (Kategorie 1). Die Ergebnisse beruhen nur auf den drei Stecherthermometern, so dass bei einer Betrachtung anhand eines Messrasters mit einer noch niedrigeren Größenordnung zu rechnen ist. Bei 38 % sind zwar die Temperaturen der drei Stecherthermometer ähnlich, aber über der Rottedauer treten nicht vertretbare Schwankungen auf. Bei 17 % aller Verläufe besitzen die drei Stecher jeweils verschiedene Temperaturniveaus und -verläufe. Der Vergleich beider Rotteschritte macht signifikante Unterschiede sichtbar. Während die beschriebene Situation im ersten Schritt als noch kritischer zu beurteilen ist, zeigt sich bei Material aus dem zweiten Schritt immerhin bei fast der Hälfte der Rottedurchgänge noch ein angestrebtes Betriebsverhalten.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch eine Materialumsetzung eine Stabilisierung des Betriebsverhaltens erreicht werden kann. Gleichwohl stellen sich nicht in jedem Fall angestrebte Bedingungen im Haufwerk ein. Die segmentweise Umlagerung mit fehlender Rück-

vermischung ist hierfür ein wesentlicher Grund. Mögliche Ursachen der Stabilisierung im zweiten Rotteschritt werden in der Literatur nicht in verwertbarem Maße diskutiert. In Betracht kommen die mechanischen Beanspruchungen beim Umsetzvorgang, die über dem Querschnitt des Haufwerks zu einem lokalen Ausgleich von Unterschieden im Stoffsystem führen. Der geringere spezifische Durchströmwiderstand von Rottegut im zweiten Rotteschritt vermindert die Unterschiede in der Durchströmbarkeit im Vergleich zu den durch Randgängigkeit geprägten Bereichen. Das Strömungsfeld im Haufwerk dürfte sich etwas ausgleichen und die Auswirkungen der systematischen Vorzugsströmungen mildern. Zudem trägt die stärkere Belüftung zu einem ausgeglichenen Wärmehaushalt bei.

6.4 Wassergehalt

6.4.1 Charakterisierung

Das Haufwerk in Rotteprozessen lässt sich als Dreiphasensystem (Feststoff, Wasser, Gas) auffassen. In der Idealvorstellung bildet der Feststoff die Haufwerksstruktur, während die flüssige Phase die feste Phase benetzt (vgl. Abb. 2-3, S. 9). Das im Stoffsystem enthaltene Wasser muss in einem aeroben biologischen Prozess zwei verschiedene und dazu noch konkurrierende Aufgaben erfüllen. Diese sind:

- Transport- und Lösungsmittel von Luft, Nährstoffen und Stoffwechselprodukten
- Regulierung des Wärmehaushaltes durch Verdunstungskühlung

Dabei ist der Wassergehalt während des Prozesses durch die biologisch bedingte Wasserfreisetzung und den Einfluss der Belüftung Veränderungen unterworfen. Eine überschlägige Rechnung soll die Effekte demonstrieren.

Folgende Annahmen liegen der Rechnung zugrunde:

- Anteil der abbaubaren Organik im Stoffsystem: 54 Ma.-% (vgl. 4.1.2, S. 29)
- Wassergehalt Organik / sonstige Komponenten: 60 % (vgl. 4.3, S. 40) / 38 %
- Biologisch bedingte Wasserproduktion: 0,6 kg_W/kg_{aoTS} (vgl. 4.3, S. 42)
- Zuluft: 26 °C, relative Feuchte 60 %, Massenstrom 64 kg_{trL}/kg_{aoTS} (vgl. 7.2, S. 108)
- Abluft: 56 °C, relative Feuchte 100 %

Der gewählte Trockenluftmassenstrom beruht auf der Notwendigkeit zur Abfuhr der freigesetzten Wärme je abgebauter organischer Trockensubstanz (aoTS). Der Wasserverlust resultiert aus der Differenz zwischen dem Produkt aus Trockenluftmassenstrom und Wassergehalt von Ab- und Zuluft.

Die Berechnung des resultierenden Wassergehaltes im Haufwerk lautet:

$$WG = \frac{m_W}{m_{ges}} = \frac{m_{W,0} + \Delta m_W}{m_{ges,0} + \Delta m_W - m_{aoTS}} \quad (6-3)$$

$$\Delta m_W = m_{W,bio} + m_{W,L,ein} - m_{W,L,aus} \quad (6-4)$$

Die Masse an Wasser im System m_W beruht auf der Anfangsmenge $m_{W,0}$, welche sich aus den o.g. Annahmen ergibt, und der Veränderung im Prozess Δm_W durch biologische Freisetzung $m_{W,bio}$ und Belüftung ($m_{W,L,ein}$ und $m_{W,L,aus}$). Die Gesamtmasse des Haufwerks zum Start $m_{ges,0}$ lässt sich aus den Annahmen unter Festlegung einer beliebigen Masse an oTS berechnen. Für das Beispiel wurde 1 kg_{oTS} gewählt. Die Gesamtmasse bleibt aufgrund der Veränderung der Wassermenge und der Masse an abgebauter organischer Trockensubstanz m_{aoTS} nicht konstant.

Aus den Annahmen resultiert ein plausibler Anfangswassergehalt $m_{W,0}$ im Haufwerk von 50 %. Die Masse an produziertem und ausgetragenen Wasser sowie der Wassergehalt im Haufwerk je Abbaugrad (m_{aoTS}/m_{oTS}) sind in der Abb. 6-28 verdeutlicht.

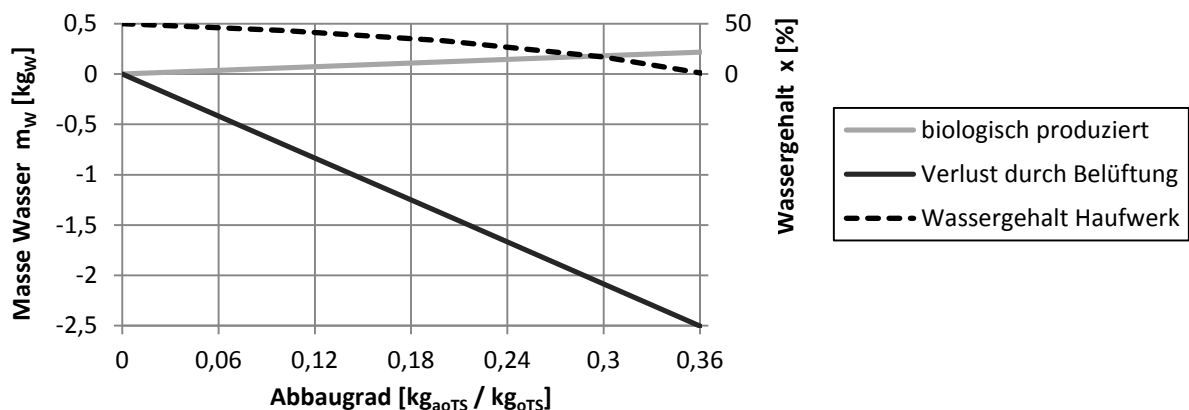


Abb. 6-28: Wasseraustrag, Wasserfreisetzung und Wassergehalt je Abbaugrad

Der Wassergehalt reduziert sich nichtlinear und erlangt bei einem Abbaugrad von 36 % den Wert Null. Die in der Literatur genannte Größenordnung von 50 % für die gesamte Intensivrotte (vgl. 4.4, S. 44) wird demnach nicht erreicht. Weil bei der Rechnung vernachlässigt wird, dass die Abbaugeschwindigkeit in der Realität mit Unterschreiten eines bestimmten Wassergehaltes abnimmt, sind noch niedrigere Werte wahrscheinlich. Für die Literaturangabe von $x = 25 \%$ für einen derartigen Grenzwert (vgl. Tab. 4-2, S. 40) ist maximal ein Abbaugrad von 25 % möglich. Berücksichtigt wird zudem nicht, dass Komponenten unterschiedlich schnell austrocknen und der Vorgang im Haufwerk ungleich verläuft. Aufgrund der Anströmung der Schüttung am Haufwerksfuß muss in diesen Bereichen ebenso wie in Vorzugsströmungswegen ein größerer Wasserverlust auftreten.

Um die negativen Effekte einer Austrocknung zu verhindern, sind in Rottereaktoren Gegenmaßnahmen erforderlich. Die Maßnahmen sind:

- Erhöhung des Wassergehaltes vor dem Rotteprozess (Anfangswassergehalt)
- Bewässerung während des Rotteprozesses

Die Schwierigkeiten bei der Umsetzung dieser Maßnahmen und die resultierenden Veränderungen im Zustand des Stoffsystems werden im Folgenden dargestellt. Obwohl die Bewässerung während des Prozesses streng genommen zur Prozessführung zählt, wird dieser Aspekt zur vollständigen Ausarbeitung des Einflussfaktors Wassergehalt mit in das Kapitel 6 zum Stoffsystem integriert.

6.4.2 Erhöhung Anfangswassergehalt

Die Auswirkungen zu hoher Anfangswassergehalte lassen eine Unterscheidung in biologisch und technisch zu. Biologisch besteht die Gefahr eines gestörten aeroben Abbaus durch wassergefüllte Luftporen und im Extremfall einer Bildung anaerober Zonen mit Folgen für das Erreichen der Prozessziele. Die Abb. 6-29 zeigt anhand der Haufwerkstemperaturen einen offensichtlichen Fall. Im ersten Rotteschritt (links) werden teilweise über 60 h zum Erreichen des Sollwertes von 55 °C benötigt. Die Werte steigen bis auf 70 °C an, sind flächendeckend ähnlich groß und Effekte der Prozessregelung werden nur in der Abkühlphase zum Ende der Rottedauer ersichtlich. Eine vergleichbare Situation wurde an der MBA-Anlage B beobachtet, bei welcher als setzungsbedingte Folge Wasser am Reaktortor austrat und die Effekte durch Untersuchung von Material an der Durchströmsäule bestätigt wurden. Der hohe Wassergehalt wirkt sich negativ auf die Haufwerksstruktur aus und zögert eine Erwärmung hinaus.

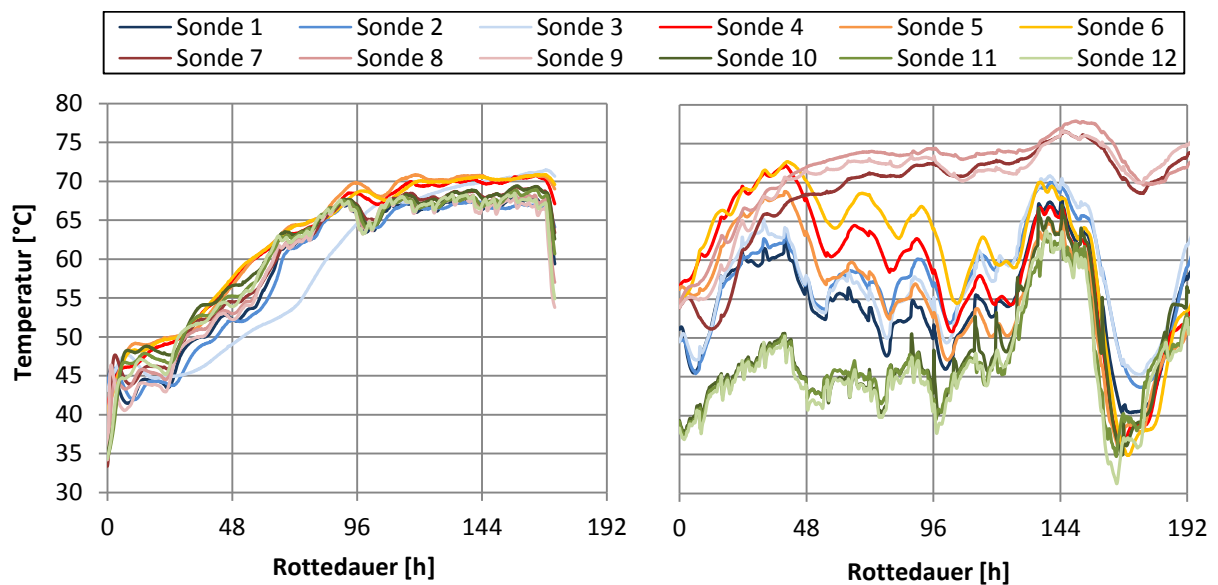


Abb. 6-29: Einfluss eines hohen Anfangswassergehaltes auf den Prozessverlauf: Haufwerkstemperaturen im ersten (links) und zweiten Rotteschritt (rechts) (TM 8)

Im zweiten Rotteschritt (rechts) zeigen sich deutliche Gradienten. Die Belüftung im ersten Rotteschritt führte zu einem Wasseraustrag aus dem Haufwerk und die lokale Vermischung bei der Materialumsetzung zu verbesserten Rottebedingungen. Die Heterogenität im Stoffsystem bestand schon im ersten Rotteschritt, die Auswirkungen wurden aber von den mangelhaften Rottebedingungen überlagert und deshalb erst im zweiten Schritt sichtbar.

Technische Auswirkungen eines zu hohen Anfangswassergehaltes zeigen sich wie folgt:

- Bildung von Agglomeraten
- Verstärkte Druckbeanspruchung im Rotteguthaufwerk
- Materialabrieb bei Reaktorleerung
- Verstärkte Beanspruchung des Belüftungsbodens

Mechanische Beanspruchungen in den Prozessstufen vor dem Reaktor führen bei nassem Rottegut verstärkt zur Bildung von Agglomeraten. Diese werden nicht zwingend bei der Reaktorbeschickung zerstört, sondern können sich sogar vergrößern. Im Haufwerk kommt es

infolge der erhöhten Masse des nassen Materials zu einer verstärkten Druckbeanspruchung. Dies führt zu Setzungserscheinungen und einer Verdichtung, die potentiell umso stärker ausfallen, je größer der Wassergehalt ist. Folge der erhöhten Haufwerksmasse kann bei Schubbodensystemen ein Materialabriss bei der Reaktorleerung sein, indem ein Teil des Materials im Reaktor zurückbleibt und nicht ausgetragen werden kann.

Die verstärkte Beanspruchung des Belüftungsbodens resultiert aus dem Auftreten von Pressflüssigkeit. Durch die Materialsetzung wird Wasser aufgrund seiner Inkompressibilität aus den Mikroporen der Partikel gepresst und in den Makroporen des Haufwerks eingelagert. Die Makroporen füllen sich mit Flüssigkeit, welche schließlich ebenso ausgepresst wird. Dadurch werden Feinstoffe mobilisiert, insbesondere mineralische Stoffe, die in der Abb. 4-3 (S. 29) nicht separat erfasst sind. Diese können sich in Makroporen der unteren Haufwerksbereiche einlagern und diese verschließen oder auf dem Belüftungsboden sedimentieren. Es kann zu einer Verstopfung der Belüftungseinrichtungen kommen und eine homogene Haufwerksanströmung stören. Bei einem auf dem Prinzip der Schubböden beruhenden Konzept der Reaktorleerung führen die Feinstoffe zu einem erhöhten abrasiven Verschleiß der Schubbodenelemente. Ein Durchbruch von Flüssigkeit bis in den Belüftungsraum führt neben einer Materialverschleppung auch zur Ausbildung einer feuchtegesättigten Atmosphäre in diesem Raum. Die eintretende Zuluft erfährt eine Wasseraufnahme, so dass die Sättigungslücke geschlossen und die Wärmeabfuhr im Haufwerk gestört wird.

Ein Durchbruch von Flüssigkeit erfolgt, wenn auf dem Fließweg kein aufnahmefähiges Rottegut vorliegt. Dabei sind drei Effekte relevant:

- Verringerte Aufnahmefähigkeit Richtung Bodenregion aufgrund Druckbeanspruchung
- Belüftungsbedingter Wasseraustrag aus der Bodenregion
- Ausbildung von Vorzugsfließwegen

Der unvermeidbare Verschluss der Mikro- und Makroporen mit der Tiefe im Haufwerk verringert zwangsläufig die Wasserkapazität, so dass Flüssigkeit nicht aufgenommen wird. Ge-steigert wird die Kapazität durch den Austrag von Wasser infolge der Belüftung. Eine positive Wirkung im gesamten Haufwerk tritt nur dann ein, wenn zum einen die Strömung gleichmäßig von der Anströmfläche durch die Schüttung erfolgt. Die Probleme hierbei wurden bereits beschrieben, weshalb in der Realität Bereiche vorliegen können, die kaum einen Wasseraustrag erfahren. In den Untersuchungen hat sich dies in einem nassen, dunklen, modrig riechendem Material gezeigt. Zum anderen muss die Flüssigkeit gleichmäßig fließen. Aufgrund von physikalischen Bindungskräften kommt es jedoch zu einer örtlich ungleichmäßigen Fließbewegung, wie die Ausarbeitungen zum Einfluss der Bewässerung in 6.4.3 (S. 102 f.) noch zeigen werden.

Rottegut weist ein breites Spektrum an Wassergehalten auf. Ursache sind die Heterogenität der Restabfallfraktion sowie die Einflüsse im Prozess. Die Zusammenstellung eigener Analyseergebnisse in der Abb. A-2 (S. 174) bestätigt dies. Es liegt eine Spannweite an Werten zwischen 29 und 53 % vor, wobei nur tendenziell signifikante Unterschiede bei einer Aufschlüsselung in die drei Materialtypen Eintrag, Umtrag und Austrag sichtbar sind. Die Spannweite muss zwangsläufig zu einem abweichenden Betriebsverhalten führen.

Bei der Festlegung geeigneter Wassergehalte werden bei der MBA Größenordnungen aus dem Bereich der Kompostierung herangezogen. Dies ist aufgrund der Nutzung aerober biologischer Prozesse prinzipiell gerechtfertigt. Allerdings müssen die grundlegenden Unterschiede in der Zusammensetzung des Stoffsystems berücksichtigt werden:

- Bei der Kompostierung fast ausschließlich nativ-organische und damit (stark) wasseraufnahmefähige Komponenten
- Bei der MBA auch nennenswerte Mengen anderer Fraktionen, die kein oder nur wenig Wasser aufnehmen (vgl. Abb. 3-4, S. 20)

Im Restabfall sind etwa 50 % organikfremde Komponenten enthalten (vgl. Abb. 4-2, S. 28), die auch in der Stufe der Stoffstromtrennung nur zum Teil vor der Rotte entfernt werden. Diese Komponenten verringern den Gesamtwassergehalt rechnerisch. Weil die prozessrelevante Wassermenge nur die nativ-organischen Komponenten einbezieht, wurden die nicht saugfähigen Komponenten in den eigenen Analysen weitestgehend durch eine Aussortierung entfernt. Die Abweichungen im Wassergehalt zwischen unsortierter und sortierter Probe lagen bei bis zu fünf Prozentpunkten. Sie werden gewöhnlich noch höher liegen, da eine vollständige Erfassung aller relevanten Komponenten nicht möglich ist.

Zur Bewertung ermittelter Wassergehalte muss der maximal mögliche Wert des Stoffsystems bekannt sein. Er lässt sich als Sättigungswassergehalt ($m_{W,maximal}/m_{ges}$) auffassen und experimentell bestimmen. Hierzu wurde in mehreren Versuchen aus einer größeren Rottegutmenge eine repräsentative Probe entnommen und diese mit etwa 5 cm Stärke auf einem nicht wasseraufnahmefähigen, aber wasserdurchlässigen Fließ (50 x 50 cm) ausgebreitet. Die Probe wurde schließlich so lang mit Flüssigkeit berieselt, bis selbige nicht mehr vom Material gehalten wurde und abließ. Die Wassergehalte wurden durch Ofentrocknung bestimmt. Die Abb. 6-30 stellt die anfänglichen (schwarze Säule) und die durch herbeigeführte Sättigung erzielten Endwassergehalte (graue Säule) unterschieden nach Eintrag, Umtrag, Austrag zusammen.

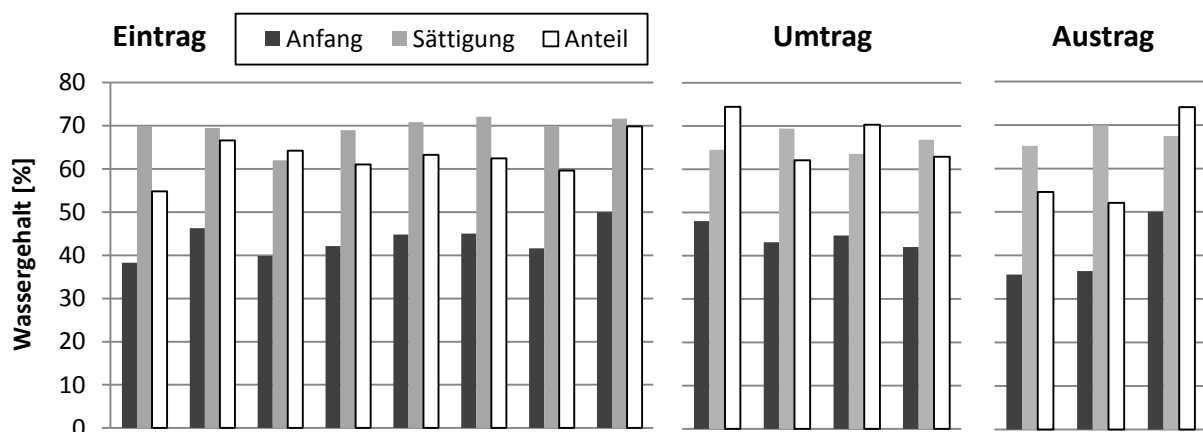


Abb. 6-30: Anfangswassergehalt und Sättigungswassergehalt (Wasserkapazität) sowie Anteil des Anfangs- am Sättigungswassergehalt von verschiedenen Chargen Rottegut

Es sind keine signifikanten Unterschiede beim Material vor, zwischen und nach den beiden Rotteschritten festzustellen, obwohl der Sättigungswassergehalt des länger gerotteten Materials durch fortschreitende Mineralisierung theoretisch abnehmen müsste. Dies ist ein weite-

rer Beleg für die Komplexität des Stoffsystems, die bereits im Zuge der Ausarbeitung möglicher Zusammenhänge zur Durchströmbarkeit sichtbar wurde (vgl. 6.2.2, S. 72 ff.). Bei Anfangswassergehalten zwischen 36 und 50 % stellten sich Sättigungswassergehalt zwischen 62 und 72 % ein.

Für die Bewertung eines Stoffsystems müssen beide Wassergehalte gegenübergestellt werden. Hierzu wurde der Wassergehalt am Anfang auf den Wert bei Sättigung bezogen und in der Abb. 6-30 als Anteil in Form der weißen Säule dargestellt. Umso kleiner der Anteil ist, umso mehr Wasser könnte vom Material noch aufgenommen werden. Mit 52 bis 74 % existiert damit theoretisch noch genug Spielraum für eine weitergehende Wasserzugabe vor der Rotte. Praktisch muss die Größenordnung in einem haufwerks- und prozessseitigen Kontext gesehen werden. Ein hoher Anteil wirkt zunächst günstig, weil die Aufgaben des Wassers erfüllt werden können. Durch den Einbau des Materials als Haufwerk wird jedoch das Aufnahmevermögen stark verringert und sich der Zustand des Stoffsystems wie diskutiert darstellen.

6.4.3 Bewässerung während des Rotteprozesses

Ein Ausgleich der belüftungsbedingten Wasserverluste während des Rotteprozesses erfolgt als einzige praktikable Lösung durch eine oberflächige Bewässerung im Rotterektor. Die aus dieser Maßnahme resultierenden Effekte beruhen auf physikalischen Mechanismen zum Wassertransport in Schüttungen und sind:

- Sättigung der Bereiche an der Haufwerksoberfläche
- Ausbildung von Vorzugsfließwegen

Die Bewässerung muss an der Haufwerksoberfläche zu einer Wassersättigung des Materials führen, weil der Flüssigkeitsverlust durch belüftungsbedingte Verdunstung an der Oberfläche ausgeschlossen ist. Die austretende Luft ist feuchtegesättigt und die Luft im Abluftraum demnach ebenso. Weil ein Transport von Flüssigkeit in tiefere Regionen erst bei Sättigung des Materials eintritt, sind aerobe Prozesse im oberen Haufwerk großräumig ausgeschlossen.

Unter Vorzugsfließweg werden in der Verfahrenstechnik Randgängigkeit und die sogenannte Bachbildung verstanden. Die Randgängigkeit wird im Rotterektor durch die erhöhte Porosität der Wandbereiche und durch die geringe Wasseraufnahmefähigkeit der in diesen Bereichen lagernden Komponenten verursacht. In den Randbereichen auftreffende Flüssigkeit gelangt deshalb zu den Wänden, fließt nach unten in den Belüftungsraum und steht dem übrigen Haufwerk nicht zur Verfügung. Vergleichbare Effekte der Fließwege sind auch in gut durchströmbaren Bereichen fernab der Wände möglich. Die Bachbildung beschreibt das Zusammenlaufen zu einzelnen Strähnen und hat ihre Ursache in der Oberflächenspannung der Flüssigkeit [Kirschbaum, 1969]. Die Ausbildung der Vorzugsfließwege führt dazu, dass Flüssigkeit in tiefere Bereiche gelangt, es jedoch zu keiner großräumigen Befeuchtung angrenzender Bereiche und damit zu einer großräumigen Rückbefeuchtung über der Schütthöhe kommen kann.

Die konstruktive Ausführung der Bewässerungsdüsen befördert die Effekte der Randgängigkeit teilweise zusätzlich. Die Abb. 6-31 zeigt beispielhaft die Situation vom Sprühprofil in den Rottetunneln der MBA-Anlage A.

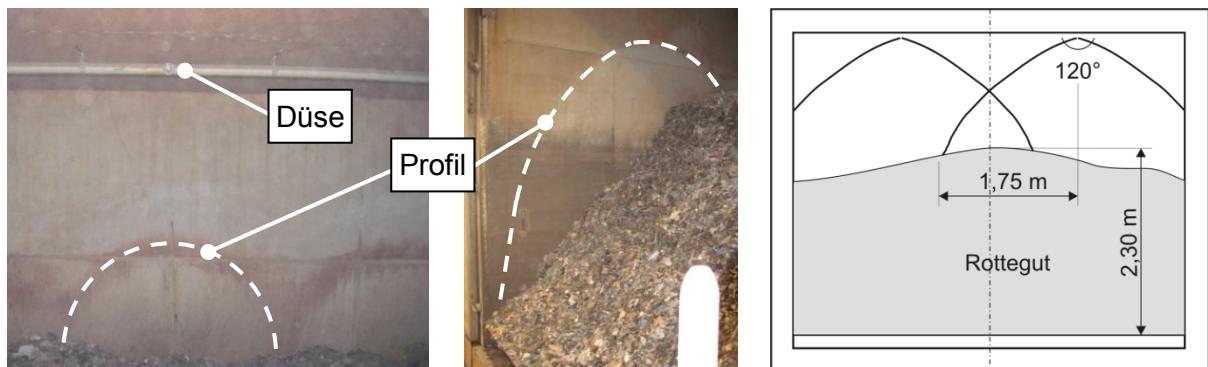


Abb. 6-31: Sprühprofil kenntlich an den Reaktorwänden (links: Beliebige Stelle, Mitte: Böschung am Tunneltor) und als Schema im Tunnelquerschnitt (rechts) [Wanka, 2011]

Das Sprühprofil und die Platzierung der Düsen führen zu einer bedeutenden Wasseraufgabe direkt an die Reaktorwände. Dadurch verstärken sich die beschriebenen Effekte einer in den Randbereichen oberflächlich auf das Haufwerk auftreffenden Flüssigkeit. Die Platzierung von Bewässerungsdüsen an der vorderen Böschung hatte zudem den Abfluss von Flüssigkeit entlang der Böschung in Richtung Tunneltor als Folge. Nach der Sättigung des Materials trat das Wasser am Tunneltor aus.

7 Wirkung der Prozessführung

7.1 Einleitung

In Kapitel 6 (S. 68 ff.) wurden die durch das Stoffsystem hervorgerufenen Einflüsse auf das Betriebsverhalten statischer Rotterektoren dargestellt. Es wurde deutlich, dass das Rottegut durch seinen Zustand (Durchströmbbarkeit einzelner Chargen, Durchströmung des Haufwerks, Wassergehalt) und dessen Verhalten unter Einwirkung der Belüftung zum bestimmenden Teil des Betriebsverhaltens wird.

Darüber hinaus bestehen äußere Einflüsse im laufenden Betrieb eines Rotterektors. Diese werden durch die Prozessführung hervorgerufen, welche durch eine Einflussnahme auf den Prozess und eine Begleitung des Prozesses gekennzeichnet ist. Die Wirkung der Prozessführung wird im vorliegenden Kapitel anhand folgender Struktur dargestellt:

- Luftmanagement
- Prozessüberwachung
- Prozessregelung

Das Luftmanagement wurde in der Abb. 6-2 (S. 69) zu den Einflussfaktoren hervorgehoben, weil die Überwachung und Regelung letztendlich nur Auslöser für eine Anpassung der Belüftung sind. Das Luftmanagement muss die Sauerstoffversorgung und Wärmeabfuhr im Haufwerk gewährleisten. Die hierfür notwendige Luftkonditionierung ist eine spezifische Aufgabe der Prozessführung. Zur Erfüllung ist zunächst eine Betrachtung des Luftmanagements an jedem Rotterektor erforderlich. Die Kopplung vieler Reaktoren einer Anlage im Luftsystem macht zusätzlich eine anlagenseitige Betrachtung notwendig, weil durch Rückwirkungen einheitliche äußere Bedingungen für die einzelnen Rotterektoren nicht unter allen Umständen garantiert sind.

Die Prozessüberwachung umfasst die Ermittlung von Messdaten, um Informationen zum Betriebsverhalten zu gewinnen und eine Beurteilung sowie manuelle oder automatisierte Steuerung der im Reaktor ablaufenden Vorgänge zu ermöglichen. Zu unterscheiden sind die Messdaten aus dem Haufwerk anhand der Stecherthermometer und aus den Luftströmen (Abluft/Zuluft).

Die Prozessregelung hat die Aufgabe, den Prozess gezielt nach spezifischen Vorgaben zum Betriebsverhalten zu führen. Herausgearbeitet werden müssen grundlegende Aspekte zum Regelungsmechanismus und dessen Flexibilität in verschiedenen Prozesszuständen.

7.2 Luftmanagement

7.2.1 Betrachtungsraum Reaktor

Jeder Rotteraktor einer Anlage muss mit Luft versorgt und die Abluft muss abgeleitet werden. Die individuelle Anpassung der Belüftung an die jeweilige Situation im Haufwerk ist die wesentliche Aufgabe des Luftmanagements. Die Möglichkeiten zur Einflussnahme auf den Rotteprozess liegen in der Intensität und der Ganglinie des Ventilators sowie in der Konditionierung der Reaktorzuluft. Die Rottetunnel sind mit einer Umluftleitung ausgestattet, in welcher durch Ansteuerung von Jalousieklappen für Umluft, Frischluft und Abluft eine Mischung der beiden letztgenannten Ströme erfolgt (vgl. Abb. 5-6, S. 52). Auf diese Weise ändern sich die Eigenschaften der Zuluft, welche entsprechend Frischluft, Umluft oder Mischluft darstellt.

Die Hintergründe für eine Konditionierung der Zuluft in den verschiedenen Phasen des Rotteprozesses sind im Folgenden darzustellen. Als Zielstellungen für den Einsatz von Misch- bzw. Umluft in der Startphase gelten:

- Beschleunigung des Prozessstarts (schnelle Erhöhung der Haufwerkstemperatur)
- Förderung einheitlicher Temperaturen im Haufwerk

Der Einsatz in der Hauptphase ist der wesentliche Anwendungsfall. Weil der Sauerstoffgehalt der Luft nach einmaliger Haufwerksdurchströmung noch ausreichend hoch ist, ist eine teilweise Rückführung möglich. Als Zielstellung der Rückführung gilt:

- Verringerung des Abluftvolumenstroms durch weniger Frischlufteinsatz

Die drei Zielstellungen sind auf ihre Erfüllung zu diskutieren. Im Mollier-h,x-Diagramm der Abb. 7-1 ist beispielhaft der Zustand für die Frischluft (FL) mit einer Temperatur $\vartheta = 26^\circ\text{C}$ und einer Feuchte $\varphi = 0,6$ sowie für die Abluft bzw. Umluft (UL) mit $\vartheta = 56^\circ\text{C}$ und $\varphi = 1$ jeweils als Punkt dargestellt.

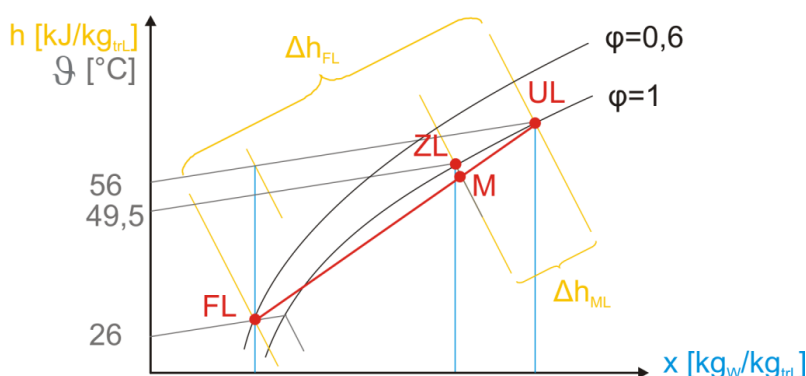


Abb. 7-1: Konditionierung der Zuluft (ZL) durch Mischung von Frisch (FL)- und Umluft (UL)

Der Zustand für die Mischung der Ströme liegt auf einer Linie zwischen den genannten Punkten. Die Position ist abhängig vom Massenstromverhältnis der trockenen Luft beider Ströme $\dot{m}_{\text{trL,FL}}/\dot{m}_{\text{trL,UL}}$, welches im Beispiel mit 1/3 angenommen wurde. Hieraus resultiert eine Mischungstemperatur von $49,5^\circ\text{C}$, die zu einem Mischungszustand M im übersättigten Bereich führt. Durch die Kondensation des Wassers stellt sich der Zustand der Zuluft auf der Sättigungslinie bei ZL ein. Die Abbildung verdeutlicht, dass nur ein kleiner Umluftanteil eine

Übersättigung durch die Mischung verhindert. Umso größer der Anteil ist, umso näher ist zudem die Zulufttemperatur bereits an dem im Haufwerk maximal erzielbaren Wert. In der Realität wird die Zulufttemperatur durch den Wärmeeintrag des Ventilators zusätzlich erhöht. In der MBA-Anlage A wurde ein Feuchtluftmassenstrom von $7.200 \text{ m}^3/\text{h}$ abgeschätzt, wodurch eine Steigerung von $49,5$ auf $51,3 \text{ }^\circ\text{C}$ resultiert¹⁵.

Eine Erwärmung der Luft im Haufwerk stellt sich im Diagramm als Verlauf entlang der Sättigungslinie von ZL bis UL dar, weil die Luft entsprechend ihrer temperaturabhängigen Sättigungslücke Wasser durch Verdunstung aufnimmt. Der Wassergehalt nimmt von x_{ZL} auf x_{UL} zu, womit bei der Mischluft (ML) ein Wärmeeustrag in Form einer Enthalpieänderung Δh_{ML} verbunden ist. Weil ein hoher Umluftanteil in der Zuluft mit einem geringen Wärmeeustrag einhergeht, kann die formulierte Zielstellung aus der Startphase zur schnelleren Temperaturerhöhung erfüllt werden.

In weiteren Überlegungen ist der Einfluss des Misch- bzw. Umluftbetriebes auf die Einstellung einheitlicher Haufwerkstemperaturen zu diskutieren. Die bisherigen Erläuterungen gingen beim Haufwerk von einer Blackbox aus, in welcher nur die Ein- und Austrittsströme sowie eine integrale Betrachtung im Inneren relevant sind (vgl. auch Abb. 4-7, S. 36). Zur detaillierten Beschreibung der Vorgänge ist ein umfangreiches Differentialgleichungssystem (Stoff- und Wärmebilanz) aufzustellen. Dies ist für die Zielstellung der Arbeit nicht notwendig. Die Vorgänge lassen sich vereinfacht qualitativ beschreiben. Die innere Energie des Haufwerks wird im Wesentlichen bestimmt durch:

- Biologische Wärmefreisetzung
- Wärmeeintrag durch Strömungsdruckverlust der Luft
- Konvektiver Wärmestrom durch Temperaturunterschied von Feststoff und Luft
- Verdunstungswärme durch Wasseraufnahme der Luft

Im Haufwerk existieren in der Startphase des Rotteprozesses stets kältere und wärmere Bereiche. Die Wärmefreisetzung beim aeroben Abbau führt in beiden Bereichen zu einer Erwärmung, die aufgrund des temperaturabhängigen Stoffumsatzes unterschiedlich stark erfolgt (die wärmeren stärker). Entsprechend des Druckverlustes bei der Durchströmung des Haufwerks wird zusätzlich kinetische Energie des Luftstroms in Wärmeenergie umgewandelt.

Die aus der Wärmefreisetzung und Wärmeumwandlung resultierende Temperaturdifferenz zwischen Haufwerk und Zuluft führt bei der Durchströmung zu einer Lufterwärmung und zu einer Verringerung der Oberflächentemperatur der Haufwerkspartikel. Mit zunehmendem Strömungsweg gleichen sich die Temperaturen an, wodurch sich die Triebkraft für den Transport der sensiblen Wärme verringert. Die Intensität der konvektiven Wärmeübertragung nimmt ab und die Haufwerkstemperatur wird sich in Strömungsrichtung ungleich ändern.

Die Durchströmung führt zusätzlich zu einer Wasserverdunstung an der Oberfläche der Haufwerkspartikel. Entsprechend der Kinetik des Stoffübergangs von Wasser in die Luft wird

¹⁵ Antriebsleistung des Ventilators im Regelbetrieb $14,25 \text{ kW}$. Bei einem Wirkungsgrad des Motors von angenommen $0,8$ und der Flügel von $0,6$ resultiert ein Wärmeeintrag von $4,56 \text{ kW}$ in den Luftstrom, der bei dem Luftstrom zur genannten Temperaturerhöhung führt.

sich die Luft mit Wasser sättigen und hierbei durch Verdunstungskühlung latente Wärme aufnehmen. Die Oberflächentemperatur der Haufwerkspartikel verringert sich. Mit dem Erreichen der Wassersättigung ist keine Wärmeabfuhr durch Verdunstung mehr möglich. Notwendig ist eine steigende Temperatur in Strömungsrichtung. Weil sich die Luft bei Durchströmung erwärmt und sich die Wasseraufnahmefähigkeit bzw. der Sättigungswassergehalt nichtlinear mit der Temperatur erhöhen, wird sich der Wassergehalt im Haufwerk in Strömungsrichtung ungleich ändern.

Die Ausführungen zeigen, dass sich im Haufwerk unvermeidbar Temperatur- und Wassergehaltsgradienten ausbilden müssen. Die Intensität ist beim Frischluftbetrieb am größten, weil Frischluft die geringste Temperatur und die größte Sättigungslücke aufweist. Umluft weist dagegen die höchste Temperatur und keine Sättigungslücke auf. Für die Ausbildung von Gradienten sind im Umluftbetrieb weniger die Eigenschaften der Luft als vielmehr die biologische Wärmefreisetzung verantwortlich. Eine Angleichung der Haufwerkstemperaturen ist in beiden Fällen nicht möglich, so dass die formulierte zweite Zielstellung aus der Startphase nicht erfüllt wird. Ein möglicher positiver Effekt von Umluft zur signifikanten Rückbefeuchtung der unteren Haufwerksbereiche tritt nicht ein. Hierzu müsste die Temperatur der Luft über einen längeren Strömungsweg größere Werte als das Rottegut aufweisen. Das ist aufgrund der geringen Wärmekapazität nicht zu erwarten.

Der bestimmende physikalische Effekt der Wärmeabfuhr durch Belüftung ist die Verdunstungskühlung. Die Erhöhung der sensiblen Wärme ist aufgrund der geringen Wärmekapazität von Luft nicht ausreichend. Die Gegenüberstellung der Enthalpie der Luftströme am Rotteraktor in Tab. 7-1 zeigt eine Differenz von Abluft und Frischluft von 314 kJ pro kg trockener Luft [kJ/kg_{trL}]. Hierzu trägt die Erwärmung der Luft nur mit 16 kJ/kg_{trL} bei, so dass fast 95 % der Wärme durch Verdunstungskühlung abgeführt wird. Aufgrund der Zusammenhänge muss der Wärmeaustrag bei Mischluftbetrieb signifikant niedriger als bei Frischluftbetrieb sein. Die Tabelle (Enthalpiedifferenz 78 kJ/kg_{trL}) und die Abb. 7-1 bestätigen dies.

Tab. 7-1: Enthalpie (Bezugszustand $\vartheta = 0\text{ °C}$, $h = 0\text{ kJ/kg}$) von Luftströmen

Luft	Temperatur	Feuchte	Enthalpie	Enthalpiedifferenz
Frischluft FL	26,0 °C	60 %	58 kJ/kg _{trL}	AL – FL: 314 kJ/kg _{trL}
Abluft AL	56,0 °C	100 %	372 kJ/kg _{trL}	
Mischluft ML (Zuluft)	49,5 °C	100 %	294 kJ/kg _{trL}	AL – ML: 78 kJ/kg _{trL}

Die Ursachen liegen im hohen Wassergehalt der Mischluft. Um Abluft ganz oder in Teilen für die Belüftung zu nutzen, ist durch eine Rückkühlung eine Abscheidung des Wassers notwendig. Die Sättigungslücke der Luft muss vergrößert werden. Andernfalls erhöht sich die Zuluftmenge linear entsprechend des Umluftanteils, während eine Verminderung der Frisch- und Abluftmenge nicht erfolgt. In der Abb. 7-2 ist der Trockenluftbedarf am Reaktor dargestellt, um eine anzunehmende biochemisch freigesetzte Wärme je abgebauter organischer Trockensubstanz von 20 MJ/kg_{oTS} (vgl. Tab. 4-1, S. 37) abzuführen. Demnach werden bei Frischluftbetrieb 64 kg_{trL}/kg_{oTS} und bei Mischluftbetrieb 255 kg_{trL}/kg_{oTS} benötigt. In Wirklichkeit ist die Menge bei Mischluftbetrieb noch größer, weil der enthaltene Wasserdampf den Feuchtluftmassenstrom entsprechend erhöht.

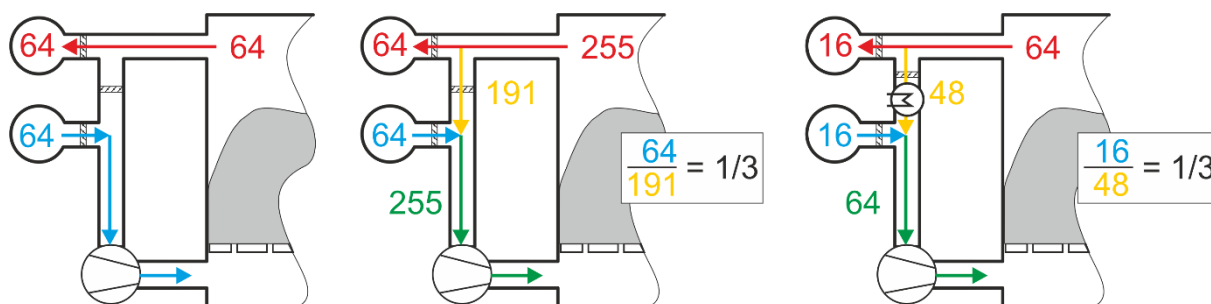


Abb. 7-2: Trockenluftbedarf zur Wärmeabfuhr von 20 MJ/kg_{oTS} bei Einsatz von Frischluft (links), Mischluft (Mitte) und Mischluft mit Kondensator (rechts). Angaben in [kg_{trL}/kg_{oTS}]

Wird das Massenstromverhältnis der trockenen Luft $\dot{m}_{trL,FL}/\dot{m}_{trL,UL}$ von 1/3 beibehalten und eine Kondensation integriert, wird hingegen eine deutliche Reduzierung der Abluftmenge erreicht. Um dieselbe Kühlfähigkeit wie Frischluft und damit denselben Trockenluftmassenstrom zu erzielen, muss die Umluft auf 20 °C abgekühlt und das Wasser abgeschieden werden. Die Zuluft- und Abluftmenge reduzieren sich dann um 75 % (siehe Abb. 7-2 rechts).

Nur unter diesen Bedingungen tritt bei einem Mischluftbetrieb eine verstärkte Ausnutzung des Sauerstoffs in der Luft ein. Bleibt der absolute Sauerstoffverbrauch im Haufwerk identisch (z.B. 2 kg_{O2}/kg_{oTS}), verringert sich der Sauerstoffgehalt beim Frischluftbetrieb von 23 Ma.-% (Zuluft) auf 19,9 Ma.-% (Abluft), weil sich die Sauerstoffmasse in den Strömen von 14,7 kg_{O2}/kg_{oTS} auf 12,7 kg_{O2}/kg_{oTS} reduziert. Bei der verminderten Frischluftmenge mit Kondensator in der Umluftleitung dagegen von 23 Ma.-% auf 10,5 Ma.-%. Die dritte Zielstellung zum Einsatz von Misch- oder Umluft wird somit nur bei Nutzung eines Kondensators erfüllt.

Der Sauerstoffverbrauch ist in der Literatur mit 2 kg_{O2}/kg_{oTS} angegeben (vgl. 4.4, S. 46). Dies entspricht beim Sauerstoffgehalt in der Luft von 23,15 Ma.-% einem Bedarf an trockener Luft von 8,6 kg_{trL}/kg_{oTS}. Der Luftbedarf zur Wärmeabfuhr bei Frischluftbetrieb beträgt 64 kg_{trL}/kg_{oTS} (vgl. Abb. 7-2 links), so dass zur Regulierung des Wärmehaushaltes mehr als die siebenfache Luftmenge im Vergleich zur Sauerstoffversorgung benötigt wird. Trotz der klaren Aufgaben ist ein Frischluftbetrieb in den Anlagen nur in Ausnahmefällen vorgesehen. Üblicherweise kommt bei sehr hohen Haufwerkstemperaturen oder bei einer gewünschten Abkühlung des Materials vor der Reaktorleerung nur Mischluft mit einem erhöhten Anteil an Frischluft zum Einsatz.

Für ein definierbares Luftmanagement ist eine Quantifizierung der Luftströme notwendig. An Anlagen ist dies häufig nicht möglich, weil Messstellen an relevanten Stellen fehlen oder aus bautechnischen Gründen keine exakten Messungen zulassen würden. Als Lösung zur Bewertung der Situationen wurde in den Untersuchungen das Druckniveau anhand des Differenzdrucks zur Umgebung herangezogen und Druckmessstellen im Abluftraum und im Belüftungsraum des Rottetunnels sowie in der Abluft- und Frischluftsammeleleitung installiert (vgl. Abb. 5-20, S. 67). Im theoretischen Normalzustand müssen Bedingungen vorliegen, die in der Abb. 7-3 schematisch dargestellt sind:

- Höchstes Druckniveau im Belüftungsraum, abhängig von der Belüftungsintensität
- Druckniveau in beiden Sammeleleitungen konstant, Werte in der Abluft am niedrigsten
- Werte im Abluftraum höher als in der Abluftleitung

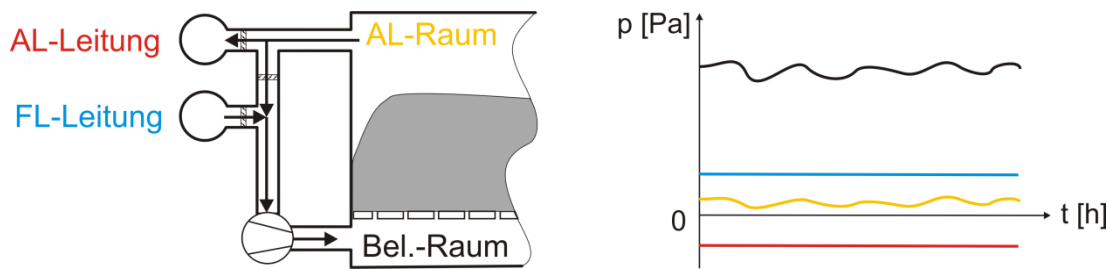


Abb. 7-3: Theoretischer Zustand der Differenzdruckverläufe und -niveaus am Rotterektor

Die Abb. 7-4 stellt im oberen Diagramm die tatsächlichen Zustände beispielhaft anhand einer Messreihe und im unteren Diagramm die dazugehörigen Betriebsdaten des Rotterektors dar. Es treten Abweichungen beim Druckniveau und der Rangordnung im Vergleich zur Theorie auf. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert:

- Sichtbare Schwankungen über der Messdauer auch ohne regelungsseitige Eingriffe
- Druck im Belüftungsraum bei verschiedenen Messreihen stark abweichend
- Fehlende absperrende Wirkung des Haufwerks und der Luftklappen
- Druck im Abluftraum wird durch Druck in der Abluftsammelleitung beeinflusst
- Betrieb des Reaktors beeinflusst Druck in der Frischluftsammelleitung nur wenig

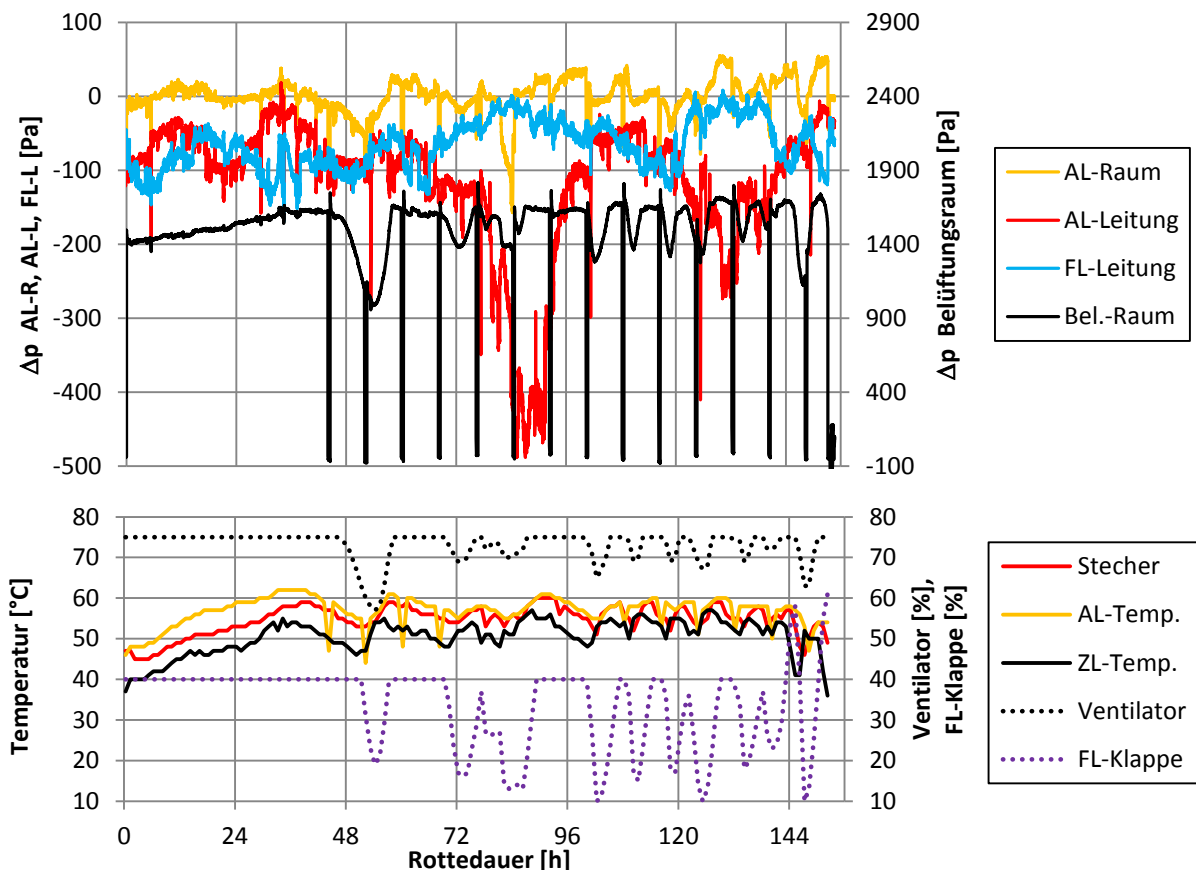


Abb. 7-4: Zeitlicher Druckverlauf Einzeltunnel: Abluftraum, Abluftsammelleitung, Frischluftsammelleitung, Belüftungsraum (oben) und wichtige Tunnelbetriebsdaten (unten) (DME 11)

Das Betriebsverhalten wird nicht nur durch bewusste Regelungseingriffe des betreffenden Reaktors mittels Ventilatorleistung und Stellung der Luftklappen bestimmt. Wesentlich müssen auch Einflüsse in der Peripherie des Reaktors sein.

Die Werte im Belüftungsraum korrelieren mit der Ventilatorleistung, so dass der für die Haufwerksdurchströmung notwendige Überdruck gegenüber dem Abluftraum ausgebildet ist. Allerdings zeigte die Auswertung aller Messreihen trotz gleicher Belüftungsintensität deutliche Unterschiede beim Druckniveau. Aufgrund des sehr hohen Niveaus spiegeln sich verschiedene Durchströmwiderstände wahrscheinlich nur bedingt wider. Aussagen sind aufgrund der Heterogenität des Haufwerks und vorliegender Vorzugsströmungen nicht möglich. Der Einfluss der Setzung stellt sich unklar dar, weil die Ventilatorleistung im Anfangszeitraum häufig eine starke Inkonstanz aufweist. Im Fall der Abb. 7-4 könnte der erfasste Druckanstieg in den ersten 36 h hierauf zurückzuführen sein.

Die regelmäßigen Minima in den Amplituden beim Druck im Belüftungsraum sind Folge der Bewässerung, da währenddessen keine Belüftung erfolgt. Der Druck ist im Fall der damit verursachten Ruhezeiten negativ und auf ähnlichem Niveau wie im Abluftraum. Dies weist auf eine fehlende absperrende Wirkung des Haufwerks und der Luftklappen zu den Sammelleitungen hin. Eine mögliche Folge sind ungewollte Ausgleichsströmungen zwischen den Sammelleitungen.

In Untersuchungen von [Wanka, 2011] wurde die Ventilatorleistung manuell verändert und die Auswirkungen auf den Druck im Abluftkanal des Tunnels (zwischen Umluftleitung und Abluftklappe) und im Zuluftkanal (vor dem Ventilator) aufgenommen. Die Abb. A-6 (S. 175) zeigt die Untersuchungsergebnisse. Aufgrund der fehlenden absperrenden Wirkung der Luftklappen lag in Ruhezeiten an beiden Messstellen ein geringer Unterdruck gleicher Größenordnung vor. Mit zunehmender Ventilatorleistung verringerte sich der Druck im Zuluftkanal, während dieser im Abluftkanal nur leicht anstieg. Der Druck im Abluftraum wird wesentlich durch den Druck in der Abluftsammelleitung und nicht nur durch die Ventilatorleistung beeinflusst. Die Abb. 7-4 bestätigt dies. Damit liegen signifikante Auswirkungen vor, weil die belüftungsrelevante Druckdifferenz zwischen den Räumen unter und über dem Haufwerk zum Teil undefinierbar beeinflusst wird.

In Zeiten ohne gravierende Regelungseingriffe kommt es nur unmerklich zu einer Beeinflussung der Situation in der Frischluftsammelleitung. Das weite Öffnen der Frischluftklappe bei gleichzeitig hoher Ventilatorleistung, z.B. zum Ende der Rottedauer, kann hingegen zu einer Auswirkung führen, indem der Druck in der Leitung geringer wird.

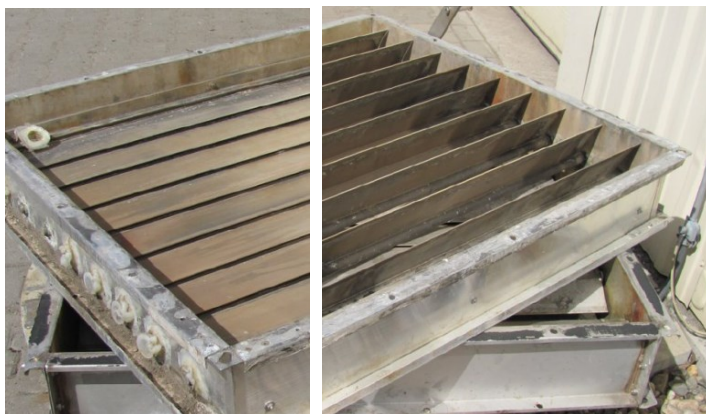


Abb. 7-5: Jalousieklappe demontiert und gereinigt. Links: geschlossen, Rechts: geöffnet [Umbach, 2011]



Abb. 7-6: Frischluftklappe demontiert [IVU, o.J.]

Die Darstellungen zeigen, dass am Rotteraktor undefinierte Druckzustände vorliegen. Die Auswirkungen werden im folgenden Kapitel diskutiert. Sie haben ihre Ursache in der pneumatischen Kopplung durch das Luftsystem und in den verbauten Jalousieklappen. Die Abb. 7-5 zeigt links eine Klappe im geschlossenen und rechts im geöffneten Zustand. Solche technischen Lösungen erlauben nur eine Regulierung, aber keine Absperrung von Volumenströmen. Damit ist eine zielgerichtete Wirkung ausgeschlossen.

Die Funktion der Klappen wird durch eine Verschmutzung weiter eingeschränkt. Die Abb. 7-6 zeigt dies am Beispiel einer ausgebauten Frischluftklappe, wobei alle Lamellen im geschlossenen Zustand (Stellwinkel 0°) sind, die obere Lamelle aufgrund einer einseitigen Verschmutzung infolge eines inhomogenen Strömungsfeldes jedoch noch teilweise geöffnet ist. Die Vielzahl an Übergabestellen der Transportbänder in der Anlage, die langen Transportwege auf den Bändern und die Reaktorbeschickung führen zu Emissionen von Staub, Wasserdampf und organischen Stoffen. Infolge der Luftabsaugung in der Anlage gelangen die Emissionen in die Luftleitungen und lagern sich ab. Das Strömungsprofil und die Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten der Frischluftklappe sind hierfür wesentliche Auslöser.

7.2.2 Betrachtungsraum Anlage

In Abhängigkeit der Prozessphase und der konkreten Situation im Betrieb variieren bei jedem Reaktor stetig der Luftbedarf, die angestrebte Luftzusammensetzung und die Abluftmenge. Der Anschluss mehrerer Reaktoren an Sammelleitungen in einem gemeinsamen Prozessluftsystem stellt eine Kopplung der Reaktoren untereinander dar, so dass die einzelnen Betriebszustände auf diese Leitungen einwirken. Dadurch werden bestimmte Zustände an jedem Reaktor von außen vorgegeben, welche als Störung auf der Zu- und Abluftseite wirken. Gleichzeitig können die Zustände in den Leitungen von außen bestimmt werden, z.B. durch eigene Zentralventilatoren oder Vorgaben zur Gesamtluftmenge. Die zur Luftkonditionierung erforderliche technologische Verbindung zwischen der Abluft- und Zuluftleitung an jedem Reaktor verstärkt die Wirkungen der Kopplung zusätzlich.

Die Darstellungen zum Betrachtungsraum Reaktor in 7.2.1 (S. 105 ff.) haben Störungen verdeutlicht, die gezielte Einwirkungen auf einzelne Reaktoren nur begrenzt möglich machen. Die Ursachen basieren auf der Kopplung der Reaktoren und stellen sich wie folgt dar:

- Beeinflussung des Drucks in der Frischluft- und Abluftsammeleitung untereinander
- Kurzschlussströmungen im Luftsystem
- Beeinflussung der Reaktoren untereinander

In der Abb. 7-4 (S. 109) wird die Wirkung eines gekoppelten Luftsystems bestätigt. Ein hoher Druck in der Frischluftsammeleitung (infolge eines geringen Frischluftbedarfs in der Anlage) führt zu einem niedrigen Druck in der Abluftleitung, weil weniger Abluft entsteht. Die Einbeziehung der Zulufttemperatur verdeutlicht den Einfluss auf das Betriebsverhalten. Sinkt der Druck in der Frischluftleitung, führt dies bei sonst konstanten Bedingungen bzgl. Ventilatorleistung und Klappenstellung zu einer Erhöhung der Temperatur. Der umgekehrte Fall gilt ebenso. Infolge des niedrigen Drucks in der Sammeleitung wird weniger Frischluft durch den

Ventilator angesaugt, so dass der Anteil der Umluft in der Zuluft ungewollt größer wird. Sichtbar wird dies anhand der Zulufttemperatur. Eine Auswirkung auf die Haufwerkstemperatur (dargestellt als Mittelwert der drei Stecherthermometer) kann damit folgen, tritt in jedem Fall aber nur verzögert ein.

Der theoretische Zustand ist ein Überdruck in der Frischluftleitung und ein Unterdruck in der Abluftleitung (vgl. Abb. 7-3, S. 109). Der Druck unter dem Haufwerk wird durch den Ventilator am Reaktor entsprechend der gewählten Leistungsaufnahme verstärkt. Der Druckausgleich zwischen Frischluft und Abluft erfolgt im Normalfall über das Haufwerk. Die Abb. 7-7 zeigt den resultierenden Strömungsweg vereinfacht als grüne Linie.

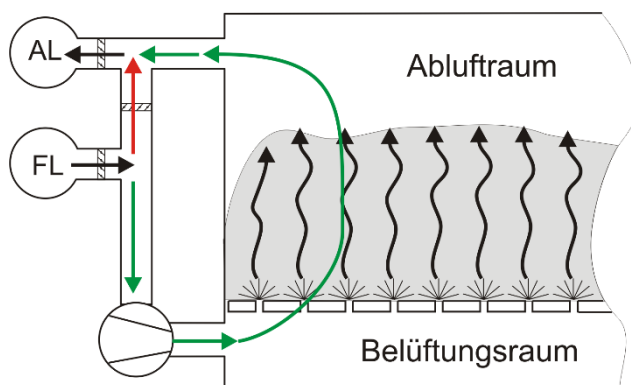


Abb. 7-7: Strömungswege zwischen den Luftsammelleitungen

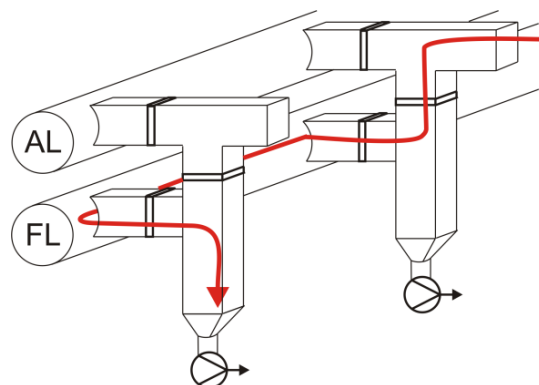


Abb. 7-8: Falschlufthweg zwischen zwei Rottetunneln durch Luftsammelleitungen

Aufgrund der fehlenden Absperrwirkung der Jalousieklappen und des geringen Druckverlustes ist auch ein direkter Weg über die Umluftleitung möglich. Es kommt zum unerwünschten Kurzschluss zwischen den Sammelleitungen, wie als rote Linie gezeigt. Bei einer geringen Ventilatorleistung und bei Ruhezeiten strömt in diesem Fall Luft zwischen den Sammelleitungen am Tunnel vorbei und belastet die Abluftleitung durch einen zusätzlichen Volumenstrom. Sichtbar wurde dies bereits in der Abb. A-6 links (S. 175) für den Fall der Ruhezeiten. Der Zustand lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Falschlufth in der Abluftleitung

Die relevante Druckdifferenz zwischen den Sammelleitungen wird nicht durchgängig eingehalten. Die Abb. 7-4 (S. 109) zeigt Situationen, bei denen in der Abluftleitung höhere Drücke als in der Zuluftleitung auftreten. Bei anderen Messreihen lagen diese Zustände teilweise langfristig vor. Ein möglicher Auslöser ist ein gleichzeitig hoher Frischluftbedarf mehrerer Reaktoren. Dies führt im Extremfall zu einer Strömungsumkehr und aufgrund der Kopplung durch das Luftsystem zu einer Beeinflussung der Rottoreaktoren, wie in der Abb. 7-8 dargestellt. Die Abluft eines benachbarten Reaktors wird über die Umluftleitung und die Jalousieklappen in die Frischluftsammelleitung gesaugt und als Zuluft in einen anderen Reaktor gelangen. Der Zustand lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Falschlufth in der Zuluftleitung

Ein erhöhter Druck in der Abluftsammeleitung kann auch dazu führen, dass am Reaktor ungewollt die eigene Abluft angesaugt wird. Die Zuluft besteht in diesem Fall nicht nur aus

Frischlufft, sondern zum Teil aus Abluft (Umluft). Unter diesen Umständen stellt die Umluft gewissermaßen ebenfalls eine Falschlufft in der Zuluft dar.

Das Betriebsverhalten des Reaktors wird durch Falschlufft zufällig beeinflusst. Die Abb. 7-9 zeigt den Ausschnitt einer Messreihe und bestätigt die Beeinflussung anhand der örtlichen CO_2 -Konzentration im Haufwerk und relevanter Betriebsdaten.

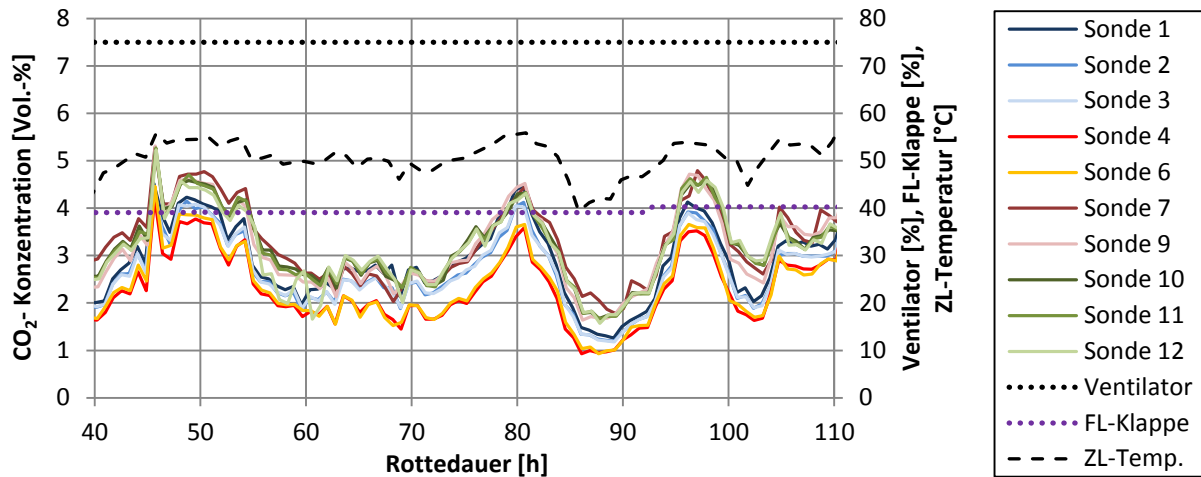


Abb. 7-9: Beeinflussung der CO_2 -Konzentration im Haufwerk durch Falschlufft (GA 5)

Obwohl die Ventilatorleistung und der Öffnungsgrad der Frischlufftklappe über lange Zeiträume konstant sind, ändern sich die CO_2 -Werte stark. Dabei ist eine Analogie mit dem Verlauf der Zulufttemperatur sichtbar. Beispielsweise gehen die Werte ab Rottedauer 80 h signifikant zurück. Dies kann nur mit der Verringerung des Falschluffteintrags erklärt werden. Es kommt zu einer unkontrollierten Änderung der Zuluftzusammensetzung, wodurch der Prozess anderweitig beeinflusst wird als es laut Regelung angestrebt war. Vorgegebene Mechanismen können hierdurch nicht die beabsichtigte Wirkung auf das Betriebsverhalten erreichen.

Die negative Beeinflussung ist an einem typischen Beispiel in der Abb. 6-19 (S. 86) sichtbar. Obwohl in der Hauptrottephase keine Anpassung der Ventilatorleistung und der Klappenstellung erfolgt, weisen die Temperaturen im Haufwerk Schwankungen auf. Auffallend ist, dass die Werte dem Verlauf der Zulufttemperatur folgen. Dieser Zusammenhang und der starke Anstieg der Haufwerkstemperatur bei 100 h Rottedauer belegen, dass die äußeren Bedingungen am Reaktor eine Auswirkung auf das Haufwerk haben.

Die Absaugung der Abluft aus der Abluftsammelleitung und die Einspeisung der Frischlufft in die Frischluffsammelleitung erfolgen jeweils zentral im Leitungssystem. Im konkreten Fall liegen die Stellen, vermutlich aus rein bautechnischen Gründen, zudem unsymmetrisch in einer Tunnelreihe (vgl. Abb. 5-8, S. 53). Bei anderen Anlagen liegen sie mittig oder als jeweils zweifache Ausführung symmetrisch verteilt. Die zentralen Ein- bzw. Ausspeisestellen führen zwangsläufig zu uneinheitlichen Bedingungen im Prozessluftsystem. In Betrieb befindliche Rottoreaktoren wirken im Leitungssystem wie parallel geschaltete Widerstände zwischen beiden Sammelleitungen. Aufgrund der jeweils abweichenden Betriebszustände der Reaktoren müssen die Widerstände verschieden sein. Es bilden sich Druckgradienten in den Leitungen aus, die zu einer ungleichmäßigen Absaugung bzw. Versorgung der Reaktoren führen.

In den Untersuchungen zur Druckmessung an Einzeltunneln wurde der Zusammenhang zur Lage des Tunnels bestätigt. Die Ergebnisse sind als Differenzdruck zwischen Abluftraum und Abluftsammelleitung in der Abb. 7-10 als Boxplot¹⁶ dargestellt.

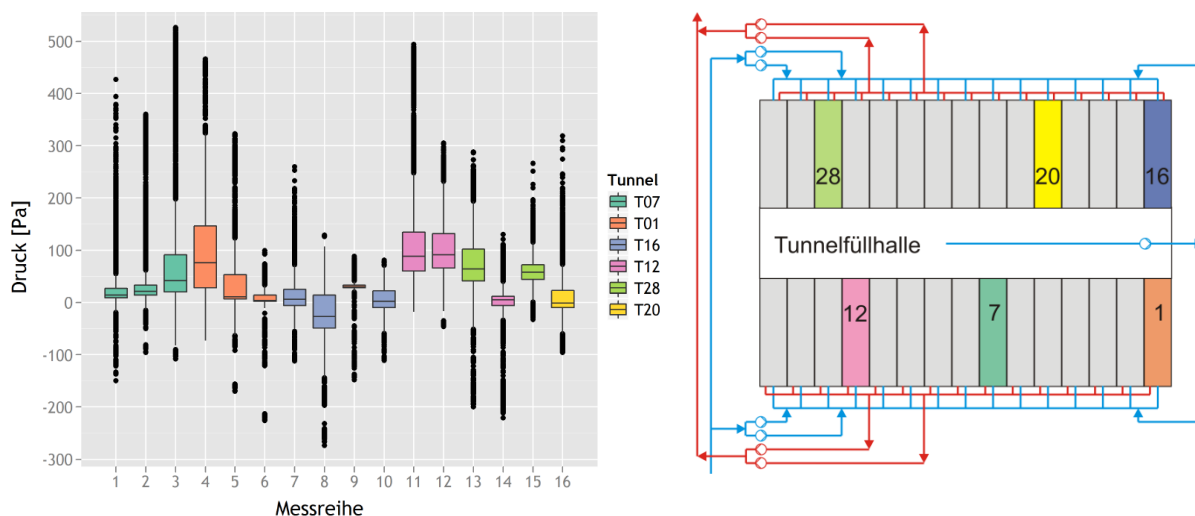


Abb. 7-10: Druckgradient in Abhängigkeit der Tunnelage: Druckdifferenz zwischen Abluft- und Abluftsammelleitung [Umbach, 2011]

Für die Belüftung stellen kleine oder negative Werte ungünstige Druckverhältnisse dar. Die entfernt von den Ein- bzw. Ausspeisestellen der Luft liegenden Tunnel zeigten demnach schlechtere Bedingungen¹⁷. Es ist folglich ein höherer Luftbedarf dieser Tunnel wahrscheinlich, um ein vergleichbares und bestimmtes Betriebsverhalten zu erreichen.

Die Bedingungen zur Belüftung werden übergreifend durch die klimatischen Verhältnisse an der Anlage beeinflusst. Die Abb. A-7 (S. 175) zeigt Messwerte in der Frischluft- und Abluftsammelleitung sowie der Außentemperatur von Anfang August 2010 bis Mitte Februar 2011. Folgende systematischen Bedingungen können festgestellt werden:

- Außentemperatur liegt immer unter der Frischlufttemperatur
- Ablufttemperatur 50 bis 62 °C, unabhängig von Außentemperatur
- Frischlufttemperatur 12 bis 40 °C, deutlich beeinflusst von Außentemperatur

Die Frischluft muss aus genehmigungsrechtlichen Gründen (Gesamtlast) aus der Anlieferungshalle und der Tunnelfüllhalle abgesaugt werden. Dadurch verringern sich die Differenz zwischen den Maximal- und Minimalwerten der Außentemperatur und damit der Einfluss der klimatischen Verhältnisse. Allerdings ist diese Luft stärker mit Wasser beladen und stellt damit keine wirkliche Frischluft dar. Wie bereits in 7.2.1 (S. 105 ff.) gezeigt wurde, ist für die Wärmeabfuhr aus dem Haufwerk weniger die Temperatur als vielmehr der Wassergehalt der Luft relevant. Die Situation wirkt sich nachweisbar auf das Betriebsverhalten aus.

Bei den Betriebsdaten von 2010 wurden Standardabweichung und Median relevanter Daten für jeden Tunnel ermittelt und für den Zeitraum Januar bis März und April bis Juli unter-

¹⁶ Innerhalb der Box liegen 50 % aller Messwerte. Der Strich gibt den Median aller Messwerte an und die Antennen stellen Werte dar, die bis oder außerhalb der 1,5-fachen Länge der Box liegen.

¹⁷ Messreihe 14 stellt einen Ausreißer dar, weil in dieser Zeit eine Revision der RTO-Anlage lief.

den (siehe Tab. A-6, S. 178). Für den Winterbetrieb der Anlage konnten günstigere Bedingungen nachgewiesen werden. Die Ventilatorleistung lag im Winter bei 65 % und im Frühjahr bei durchschnittlich 70 %. Die bessere Kühlfähigkeit der Zuluft (geringere Feuchte) und die gleichzeitige Verschiebung der Gesamtwärmebilanz der Anlage (größere Wärmeverluste an die Umgebung) verringern den Luftbedarf. Der Öffnungsgrad der Frischluftklappe betrug im Winter etwa 30 % und im Frühjahr 35 %. Die Standardabweichung bei der Klappenstellung und bei der Ventilatorleistung ist im Winter größer als im Frühjahr, so dass im Winter eine intensivere Beeinflussbarkeit des Prozesses gegeben ist.

7.3 Prozessüberwachung

7.3.1 Örtliche Temperaturmessung durch Stecherthermometer

Als typische Vertreter der MBA-Konzeption stehen die untersuchten Anlagen beispielhaft für die installierten technischen Einrichtungen der Prozessüberwachung (vgl. Abb. 5-4, S. 52). Die Temperaturen der Stecherthermometer stellen während des Betriebes das wichtigste Hilfsmittel zur manuellen Beurteilung des Prozesses dar. Im automatisierten Betrieb sind die Messdaten Grundlage zur Regelung der Ventilatoren. Der Einsatz von drei Stechern gibt im vorliegenden Fall die Charakterisierung eines Schüttungsvolumens je Messstelle von 115 m³ wieder (10 x 5 x 2,3 m). Für die Prozessüberwachung hat die Nutzung nur weniger Thermometer spezielle Auswirkungen, welche anhand der Abb. 7-11 erläutert werden.

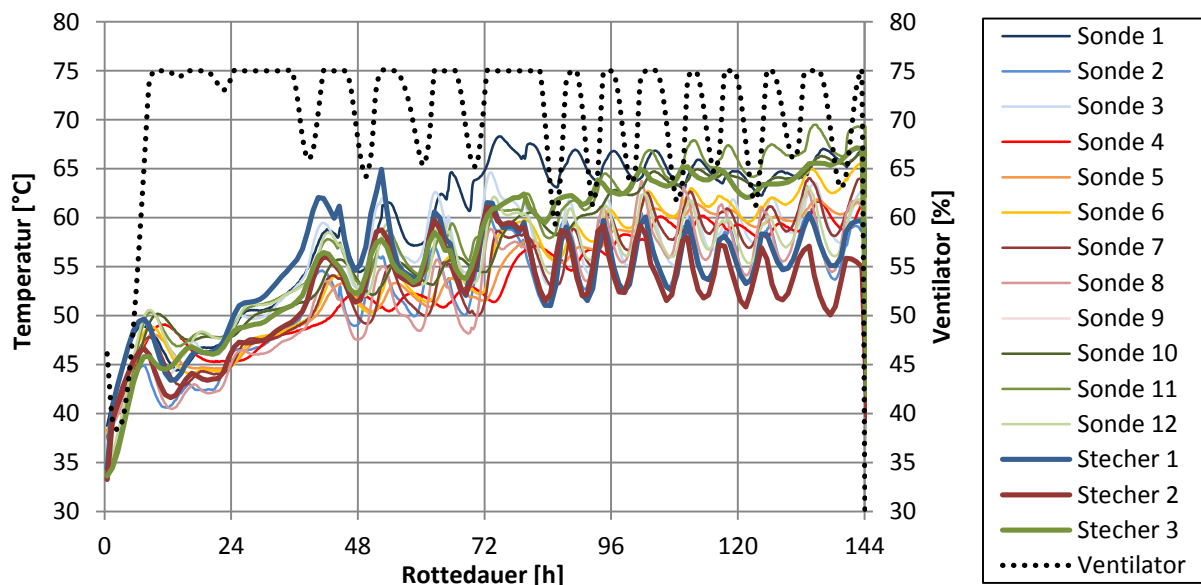


Abb. 7-11: Haufwerkstemperatur ermittelt mit Stecherthermometer und Sonden (TM 4, 1.)

Es liegen gravierende Unterschiede zwischen den Messwerten der verteilt platzierten Messsonden, den Stechern und jeweils untereinander vor. Bereits auf kleinem Raum treten große Temperaturdifferenzen auf. Dies ist ein typisches Merkmal statischer Rottereaktoren, bei denen das Rottegut stark von optimalen Eigenschaften (Homogenität) abweicht. Es existieren keine repräsentativen Stellen im Haufwerk (Vorzugsmesspunkte), die für die Prozesscharakterisierung des gesamten Reaktorinhaltes aussagekräftig sind.

Die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten beruhen insbesondere auf folgenden Aspekten:

- Fehlende Informationen (Messdaten) zu vielen Bereichen im Haufwerk
- Überwachung erfolgt in Regionen mit zufälligen Eigenschaften
- Direkte Beeinflussung der Messdaten durch den Luftstrom möglich

Viele Bereiche sind einer Überwachung und Bewertung entzogen, während die Messstellen durch ihre systematische Positionierung nur zufällige und damit für die Gesamtheit des Haufwerks nicht zwingend repräsentative Zustände aufnehmen. Es sind ungewollte Auswirkungen auf die messtechnisch verborgenen Regionen und auf das gesamte Haufwerk möglich, weil der Prozessführung wichtige Informationen zum Zustand des Haufwerks fehlen oder vorliegende Daten als vermeintlich repräsentativ gewertet werden. Beispielsweise würde die reine Orientierung am Stecher 3 in der Abb. 7-11 die Schlussfolgerung einer hohen Haufwerkstemperatur zulassen. Als Effekt würde die Belüftungsintensität erhöht und somit in den übrigen Haufwerksbereichen zu einer übermäßigen Durchströmung und einer Abkühlung führen.

In den ersten Versuchsreihen wurden mit den Messsonden fast durchgängig Temperaturen ermittelt, die über denen der Stecherthermometer lagen (vgl. auch Abb. 7-11). Als Ursache konnte die stets zu geringe Einbauhöhe der Stecher im Haufwerk ermittelt werden. Diese lag nur 25 cm über dem Belüftungsboden, während die Sonden bei etwa 100 cm platziert wurden. Mit einer zu niedrigen Einbauhöhe gehen folgende Effekte einher:

- Höhere Temperaturen in größerer Haufwerkshöhe werden nicht erfasst
- Direkte Anströmung der Thermometer durch die Luft erfolgt schneller

Die Messwerte unterschiedlich hoch platzierter messtechnischer Einrichtungen unterscheiden sich, weil im Festbett ein vertikaler Temperaturgradient vorliegt (vgl. 7.2.1, S. 105 ff.). Zur Untersuchung des Gradienten wurde ein Stecherthermometer mit einem Thermoelement versehen und an sechs in Betrieb befindlichen Rottetunneln nacheinander an den Positionen der drei Stecher Werte in 0,2 m, 1 m und 2 m über dem Boden aufgenommen. Die Ergebnisse in der Abb. 7-12 zeigen vertikale Temperaturdifferenzen von durchschnittlich 6 K und ein überwiegend lineares Profil über der Höhe mit einem Anstieg um im Mittel 3 K pro Meter.

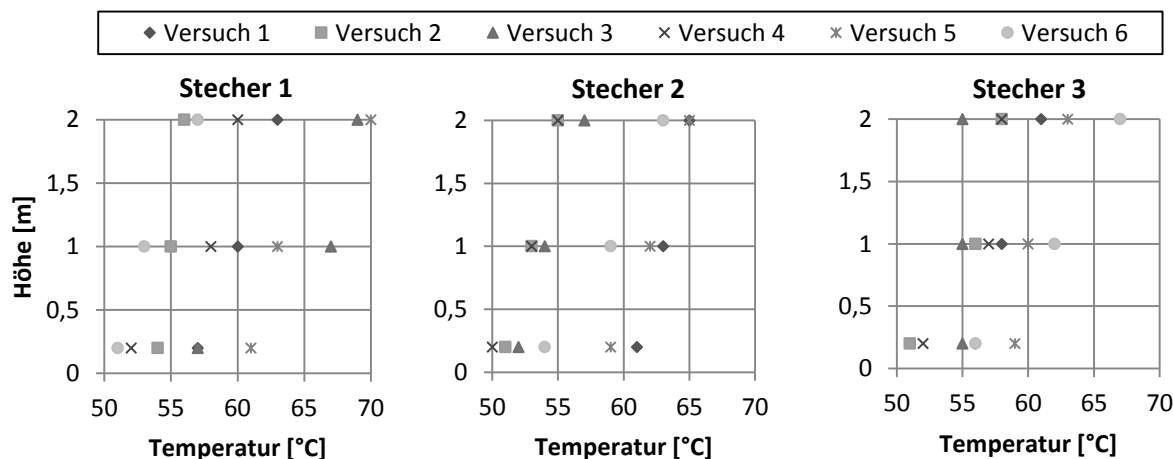


Abb. 7-12: Temperaturprofil im Rotteguthaufwerk an der Position der Stecherthermometer für sechs untersuchte Rottoreaktoren

Der zweite mögliche Effekt einer zu niedrigen Einbauhöhe ist eine direkte Luftanströmung der Messstelle. Infolge der Belüftung bilden sich beginnend am Haufwerksfuß Vorzugsströmungswege im Haufwerk aus, welche sich nach oben ausweiten. Umso tiefer die Messstelle sitzt, umso schneller erreichen diese Wege die Messstelle und beeinflussen das Messergebnis. Es kann eine Erwärmung (z.B. bei Umluftbetrieb) und Homogenität im Haufwerk vorge täuscht werden, obwohl dagegen starke Unterschiede in der Durchströmbarkeit und biologischen Aktivität vorliegen. Die Messwerte haben nur einen geringen Bezug zu den tatsächlichen Vorgängen im Haufwerk. Messstellen mit einer niedrigen Einbauhöhe zeigen eine größere Dynamik bei Änderungen der Belüftung, weil sich die Pufferwirkung des Rottegutes weniger stark bemerkbar macht. In der Abb. 7-11 ist die Wirkung an den leicht größeren Amplituden der Stecher 1 und 2 im Vergleich zu den Messsonden festzustellen.

In den Versuchen ab TM 8 wurde die Einbauhöhe der Stecherthermometer von 0,25 auf 1 m angehoben und die absehbaren positiven Effekte erfasst. Die Abb. 7-13 zeigt beispielhaft, dass neben den Messsonden nun auch mit den Stechern die Kerntemperaturen des Haufwerkes registriert wurden. Der reale Zustand war bislang verborgen geblieben und konnte nicht in die Prozessregelung einfließen. Im Durchschnitt der Messreihen nahm die Ausprägung der Heterogenität bei den Stecherthermometern qualitativ ab. Dabei ist zu beachten, dass die Ausbreitung von Vorzugsströmungswegen mit der Maßnahme nicht verloren geht, sondern nur später erfasst wird.

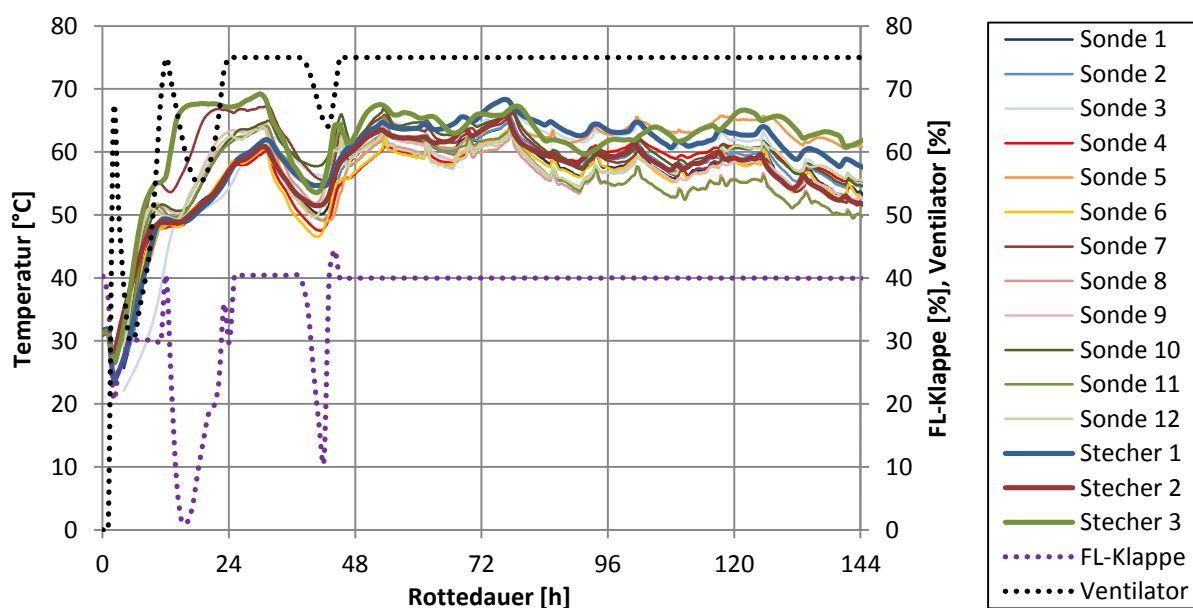


Abb. 7-13: Haufwerkstemperaturen und wichtige Betriebsdaten bei korrigierter (höherer) Positionierung der Stecherthermometer (TM 11, 1.)

Aufgrund der erforderlichen Robustheit der Stecherthermometer sind diese aus dickwandigem Metall gefertigt. Dadurch ergibt sich eine weitere Beeinflussung der Messwerte, weil Temperaturgradienten im Haufwerk eine Wärmeleitung im Stecherrohr hervorrufen. Die Temperaturen werden mit einem an der Spitze des Rohres sitzenden Thermoelements registriert und liegen deshalb im Vergleich zur Realität zu hoch. Zwar verringert sich hierdurch messtechnisch der Unterschied zur maximalen Haufwerkstemperatur in größerer Höhe. Verbesserungen bei der Erfassung des wirklichen Betriebszustandes ergeben sich jedoch nicht.

7.3.2 Messwerte in der Zuluft und Abluft

Die Überwachung der Zuluft- und Abluftmesswerte hat keine direkte Auswirkung auf das Betriebsverhalten. Die Werte werden nur bei Bedarf als Regelgröße berücksichtigt. So haben die Temperatur und der Zuluftdruck üblicherweise nur orientierenden Charakter, während der Sauerstoffgehalt in der Abluft teilweise die Zuluftkonditionierung bestimmt. Bei der Bewertung der Messwerte müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Homogenität der Haufwerksdurchströmung und Haufwerkseigenschaften
- Systemdruck in den Sammelleitungen
- Eintrag von Falschluf in die Zuluft

Der Zuluftdruck (Anströmdruck im Belüftungsraum) ist zur Bewertung des Prozesszustandes nur dann geeignet, wenn das Haufwerk eine Homogenität bzgl. der Durchströmbarkeit aufweist. Dies ist nicht gegeben. Der Wert wird durch Vorzugsströmungen im Haufwerk, Verstopfungen im Belüftungsboden und zufällige Systemdrücke in den Sammelleitungen beeinflusst. Weil der Wert als Orientierung zur Belüftungsintensität angesehen wird, ergeben sich entsprechende Wirkungen auf das Betriebsverhalten. Bei einer Prozessführung mit konstantem Anströmdruck kommt es in Bereichen mit schlechter Durchströmbarkeit oder über großräumigen Verstopfungen zu einer Unterversorgung der Schüttung mit entsprechenden Effekten auf den Wärme- und Wasserhaushalt. In von Vorzugsströmungen geprägten Bereichen tritt hingegen eine Überversorgung mit Luft auf. Bei einer Prozessführung mit konstanter Ventilator Drehzahl führen die Druckschwankungen im Luftsystem zu Schwankungen im Anströmdruck mit entsprechenden Auswirkungen auf die durchgesetzte Luftmenge.

Der Eintrag von Falschluf in den Rotteraktor verhindert eine geeignete Bewertung des Prozesszustandes. Die Abb. 7-14 zeigt den Zusammenhang zwischen der örtlich im Haufwerk gemessenen CO_2 -Konzentration und der Temperatur bei konstanten Belüftungsbedingungen (Ventilatorleistung und Klappenstellung). Die übliche Korrelation steigender Konzentration mit steigender Temperatur (aufgrund des höheren Stoffumsatzes) ist nicht sichtbar, weil sich die Zusammensetzung der Zuluft undefinierbar ändert und sich entsprechend in der Gaszusammensetzung im Haufwerk bzw. in der Abluft widerspiegelt.

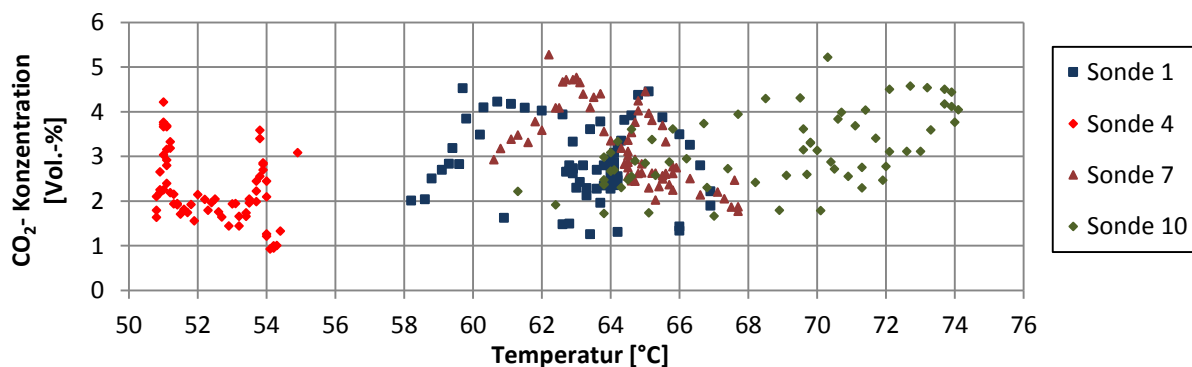


Abb. 7-14: Örtliche CO_2 -Konzentration und Haufwerkstemperatur bei konstanten Belüftungsbedingungen (GA 5)

Während die Temperatur der Abluft nur den Zustand der oberen Haufwerksschicht an der Luftaustrittsstelle charakterisiert, kennzeichnet die Konzentration die Bedingungen entlang

des gesamten Strömungsweges. Die Temperatur und Konzentration der Reaktorabluft stellen den integralen Wert aus allen Luftaustritten dar, so dass die Werte durch eine Heterogenität der Haufwerksdurchströmung und Haufwerkseigenschaften beeinflusst werden. Die Beeinflussung der Abluft wird anhand der Abb. 7-15 qualitativ beschrieben.

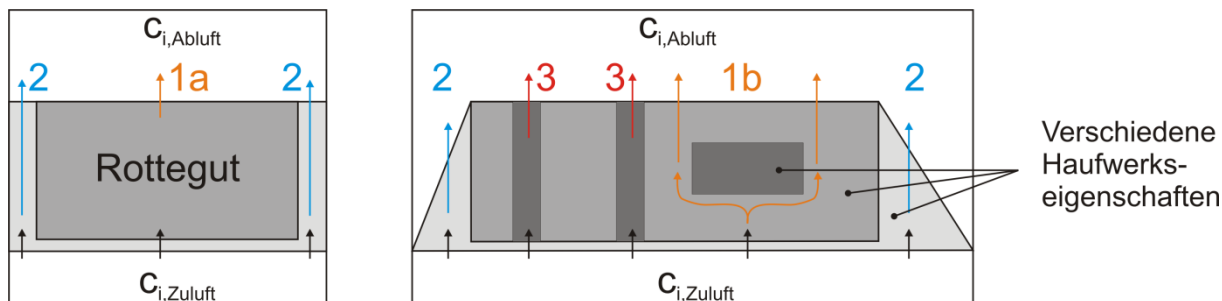


Abb. 7-15: Schematische Darstellung zur Zusammensetzung der integralen Stoffmengenkonzentration in der Abluft (links: Reaktorquerschnitt, rechts: Längsschnitt)

An den Rändern (Bereich 2) sind neben der Durchströmbarkeit auch weitere Eigenschaften des Rottegutes (z.B. Organikanteil) und damit auch die volumenspezifische CO₂-Freisetzung anders als im Haufwerkskern (Bereich 1a). Bestimmte Bereiche im Kern nehmen praktisch nicht am Rotteprozess teil, weil sie aufgrund ihrer Eigenschaften überwiegend umströmt werden (Bereich 1b). Zudem liegen aufgrund der Vielzahl an Chargen weitere Bedingungen vor (Bereich 3). Insgesamt führt die Heterogenität dazu, dass die Abluftwerte an statischen Rottereaktoren undefinierbar beeinflusst werden und eine Anwendung zur Prozessbewertung nicht zulassen.

Die Messwertbeeinflussung hat indirekte Auswirkungen auf das Betriebsverhalten. Ein Falschlufteintrag verringert die O_2 -Konzentration in der Abluft, weshalb die Belüftungsintensität erhöht und damit trotz identischer Wärmeproduktion eine unnötige Abkühlung des Haufwerks ausgelöst werden könnte. Eine Vorzugsströmung führt zu einer erhöhten O_2 -Konzentration, weshalb die Ventilatorleistung verringert oder der Umluftanteil erhöht werden könnte. Es vermindert sich jeweils die Wärmeabfuhr, gleichgültig ob es notwendig ist oder nicht.

7.4 Prozessregelung

Die Regelung¹⁸ soll den Rotteprozess nach spezifischen Vorgaben führen, um ein angestrebtes Betriebsverhalten zu erreichen. Darunter ist vereinfacht ein schnelles Aufwärmen und anschließend ein Halten bei einer konstanten Temperatur und der Betrieb bei ausreichend hohem Sauerstoffgehalt zu verstehen. Hierzu werden im Rahmen der Prozessüberwachung fortlaufend die Temperaturen der Stecherthermometer, der Zuluft und Abluft sowie die Sauerstoffkonzentration in der Abluft als variable Regelgröße erfasst und diese mit vorgegebenen Führungsgrößen verglichen. Die Abb. 7-16 zeigt den Regelkreis.

¹⁸ Begriffsdefinition gemäß DIN IEC 60050-351: Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.

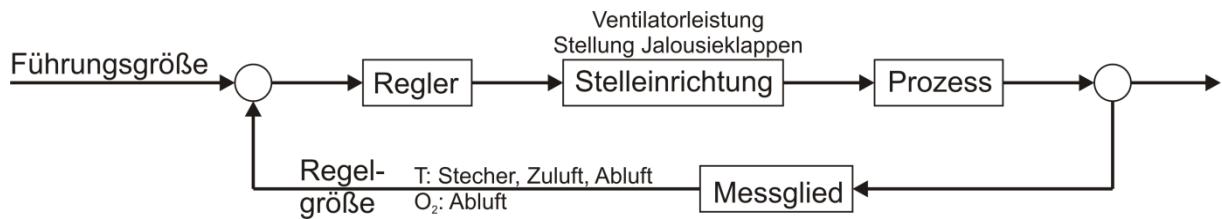


Abb. 7-16: Regelkreis einer MBA-Anlage für die Prozessregelung

Bei vorgegebenen Abweichungen werden automatisch Stelleinrichtungen angesteuert, um die Größen einander anzugleichen. Als Stelleinrichtungen fungieren die Ventilatorleistung und der Öffnungsgrad der drei Jalousieklappen. Als Reglertyp werden an den untersuchten MBA-Anlagen PID-Regler eingesetzt. Der Volumenstrom an Prozess- und Brauchwasser wird ebenfalls erfasst, aber im Regelkreis systematisch gesteuert. Der Druck nach dem Ventilator dient nur der manuellen Überwachung. In den folgenden Ausführungen werden die konkreten Mechanismen der Regelung nicht im Detail betrachtet. Angesichts der Vielzahl an Möglichkeiten zur Parametrierung der Regler stehen allgemeine Zusammenhänge und grundlegende Aspekte zum Einfluss der Regelung auf das Betriebsverhalten im Mittelpunkt.

Innerhalb eines Rotteschritts ist die Regelung in verschiedene Phasen gegliedert (Phase 1: Nivellieren, Phase 2: Aufwärmen, Phase 3: Hauptrottephase, Phase 4: Abkühlen). Der Übergang zur nächsten Phase ist von der Rottedauer und den Regelgrößen abhängig und erfolgt üblicherweise automatisiert, kann aber auch manuell angepasst werden. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Stecherthermometer im Betrieb, wird der mit diesen Messgliedern verbundene Regelmechanismus mit der Abb. 7-17 erläutert.

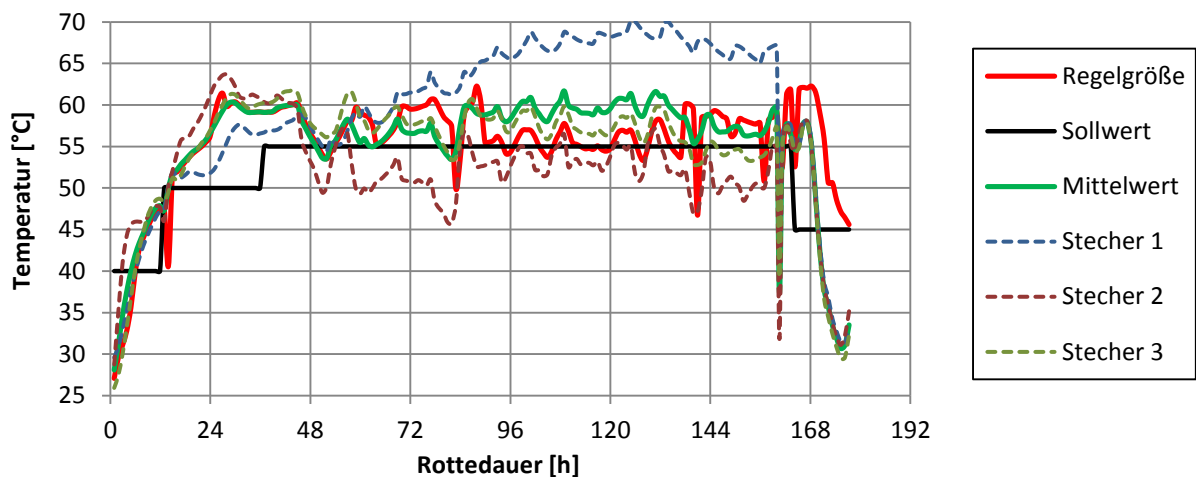


Abb. 7-17: Regelmechanismus der Stecherthermometer (TM 10, 1.)

Weil im Reaktor mehrere Thermometer platziert sind, aber nur eine Art der Stelleinrichtungen vorliegt, wird im Normalfall aus den ermittelten Temperaturen ein Durchschnitt als Regelgröße (rote Linie) gebildet. Dabei handelt es sich nicht zwangsläufig um den arithmetischen Mittelwert (grüne Linie). Die Prozessregelung ermöglicht, auf Abweichungen zwischen den Temperaturen durch Herausnahme des Stechers mit der größten Abweichung zu reagieren. Diese Methode beruht auf der Einflusslosigkeit und ist genauer zu erläutern. Die fehlende Berücksichtigung von Stecher 1 führt im konkreten Fall dazu, dass der arithmetische Mittelwert über der Führungsgröße (Sollwert, schwarze Linie) liegt.

Die Vorgehensweise blendet Störungen im Haufwerk, die sich in der Messwertabweichung widerspiegeln, rechnerisch aus. Die Messdaten ermöglichen keine Aussage darüber, ob es sich nur um eine örtliche oder um eine großräumige Störung handelt. Im ersten Fall ist die Wirkung im Betrieb vergleichsweise gering, im zweiten Fall groß. Obwohl das Ausmaß unbekannt ist, wird das Haufwerk als homogen angesehen und hierdurch die Belüftung für möglicherweise große Bereiche des Reaktors falsch geregelt. Allerdings wäre eine örtliche Differenzierung ohnehin nicht möglich. Klare Kriterien zur Identifikation einer Heterogenität sind nicht vorgesehen und damit auch keine Kriterien zu einem eventuell vorzeitigen Abbruch des Prozesses als einzige Möglichkeit.

Die Regelungsmechanismen werden bei der Inbetriebnahme der Anlage festgelegt. Die realen Bedingungen werden daher zu einer meist nicht funktionierenden Lösung führen. Die Höhenposition der Stecherthermometer bestätigte dies anschaulich. Die Anhebung von anfangs 0,25 m auf 1 m zeigte als negativen Effekt, dass die Regelung den tatsächlichen Gegebenheiten nicht mehr Rechnung tragen kann. In der Abb. 7-13 (S. 117) ist ersichtlich, dass die Ventilatorleistung und Klappenstellung ab der Betriebsdauer von 40 h jeweils am festgelegten maximalen Arbeitspunkt liegen. Die Überschreitung der Solltemperatur wird zwar registriert, kann aber nicht kompensiert werden. Eine Einwirkung auf das Betriebsverhalten ist nicht mehr möglich, weil Regelungseinflüsse in der neuen Situation unwirksam werden. Ähnliche Probleme können aus veränderten Rotteguteigenschaften oder durch modifizierte bzw. neue Technik auftreten.

Das Betriebsverhalten der Rottereaktoren ist trotz identischer Prozessregelung stets verschieden. So wurde bei den Temperaturverläufen eine unterschiedliche Dauer zum Erreichen des Sollwertes von 55 °C benötigt. In der Abb. 7-17 beträgt diese etwa 24 h und in der Abb. 7-11 (S. 115) immerhin 40 h, obwohl das Ziel aus ökonomischen Gründen in einer raschen Erhöhung liegt. In manchen Fällen kommt es nach dem Erreichen des Sollwertes zu einem weiteren Temperaturanstieg, der in den Abb. 7-18 und Abb. 7-19 erst bei über 65 °C endet („Überschwingen“). Weil regulatorische Maßnahmen zunächst keine Wirkung zeigen, gehen die Werte teilweise erst nach mehreren Stunden auf ein niedrigeres Niveau zurück.

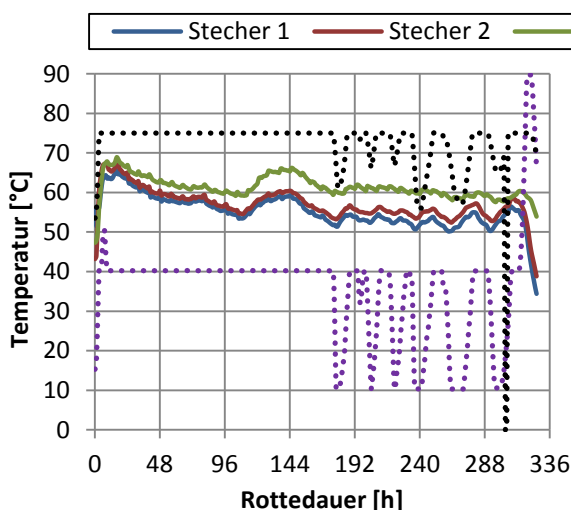


Abb. 7-18: „Überschwingen“ in der Anfangsphase des Rotteprozesses (TM 11, 2.)

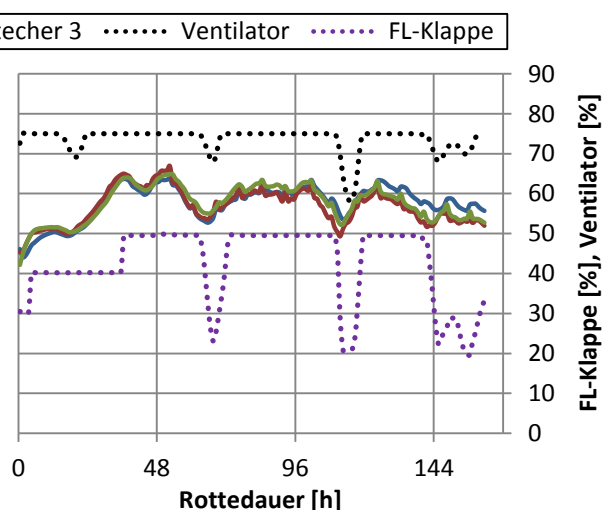


Abb. 7-19: Verzögerung und „Überschwingen“ im Rotteprozess (TM 2)

Die Regelung kann nur bedingt auf die Vielzahl an Einflussfaktoren von Stoffsystem und Luftmanagement reagieren. Eine langsame Erwärmung zum Start kann Ursache einer zu starken Belüftungsintensität mit Frischluft sein. Wahrscheinlich ist vielmehr das Vorliegen von schlecht rottefähigem Material, z.B. infolge eines hohen Wassergehaltes. Eine schnelle Erwärmung und ein Überschreiten der Solltemperatur kann die Folge einer starken Wärmeproduktion oder einer nicht ausreichend guten Durchströmbarkeit sein. Auch eine ineffektive Prozessregelung ist möglich. So ist der Öffnungsgrad der Frischluftklappe in den Phasen der Temperaturüberschreitung bei den Abb. 7-18 und Abb. 7-19 auf 40 bzw. 50 % begrenzt. Dagegen führt eine Erhöhung auf 90 % zum Ende der Rottedauer in der Abb. 7-18 zu einer signifikanten Temperaturerniedrigung. Frühzeitige Eingriffe dieser Art würden ein Überschreiten verhindern, finden in der Startphase aber nicht und in der Hauptrottephase üblicherweise nur manuell statt.

In der Hauptrottephase erfolgt ein Betrieb innerhalb von festgelegten Ober- und Untergrenzen der Reglerparameter. Zusammen mit dem Schließen der Frischluftklappe verringert sich auch die Ventilatorleistung, wobei die Zeiträume bis zum nächsten Eingriff temperaturabhängig und teilweise 12 h oder länger sind. In Kombination zeigen sich Amplituden beim Temperaturverlauf, welche unterschiedlich stark ausfallen aber durchschnittlich 10 K betragen. Einen wesentlichen Einfluss auf derartige Schwankungen haben jedoch nicht nur Regelungsmechanismen, sondern auch die dargestellten zufälligen Systemdrücke im Prozessluftsystem. Dieser Zusammenhang zeigt sich ebenfalls in den Abb. 7-18 und Abb. 7-19.

8 Diskussion

8.1 Überblick zu den Problemen statischer Rottereaktoren

Das Betriebsverhalten statischer Rottereaktoren wird durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Von Bedeutung sind:

- Kennzeichnende, unvermeidbare Merkmale des verfahrenstechnischen Konzeptes
- Technische Realisierung des Konzeptes
- Eigenschaften des eingesetzten Stoffsystems
- Prozessführung

Die Ausführungen haben verdeutlicht, dass Rottereaktoren Probleme unterschiedlicher Ausprägung aufweisen können. Diese sollen im Folgenden als Überblick und als Diskussionsgrundlage zusammenfassend dargelegt werden. Obwohl die Untersuchungen an konkreten Anlagen durchgeführt wurden, können hieraus verallgemeinerungsfähige Aussagen für statische Rottereaktoren formuliert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich übertragen, wenn zwischen konzeptionsbedingten Merkmalen und konstruktiven Merkmalen bestimmter Anlagentypen unterschieden wird, die jeweils zu den Problemen führen. Für die Diskussion wird hierzu eine Einordnung gemäß der Abb. 8-1 vorgenommen.

Merkmale statischer Rottereaktoren			
Konzeptions- bedingt	Konstruktion bestimmter Anlagentypen		
<u>Festbett und be- stimmte Randbe- dingungen</u>	<u>Stoffstromtrennung</u> - Teilstrom - Vollstrom	<u>Reaktorbeschickung</u> - Radlader - Schleuderband - Verfahrband	<u>Luftsystem</u> - Keine Umluftleitung - Umluftleitung mit Kondensator - Umluftleitung ohne Kondensator

Abb. 8-1: Konzeptionsbedingte und konstruktive Merkmale statischer Rottereaktoren

Die konzeptionsbedingten Merkmale beziehen sich auf die grundsätzlichen Eigenschaften eines Festbetts und auf bestimmte Randbedingungen. Die damit verbundenen Probleme sind unvermeidbar und lassen sich durch Ertüchtigungsmaßnahmen nicht lösen. Die konstruktiven Merkmale beziehen sich auf die konkrete technische Realisierung des Reaktors. Es erfolgt eine Differenzierung bzgl. der Art der Stoffstromtrennung, der Reaktorbeschickung und des Luftsystems. Hierfür sind Maßnahmen zur Verbesserung realisierbar. Eine gesonderte Unterscheidung der geschlossenen Rottesysteme zwischen den Ausführungen (Box, Tunnel, Container) ist nicht notwendig.

Die Abb. 8-2 fasst die potentiellen Probleme in die bekannte Struktur von Stoffsystem und Prozessführung sowie thematisch zu einzelnen Blöcken angeordnet zusammen. Die rote Umrandung von Blöcken kennzeichnet konzeptionsbedingte (unvermeidbare) Probleme.

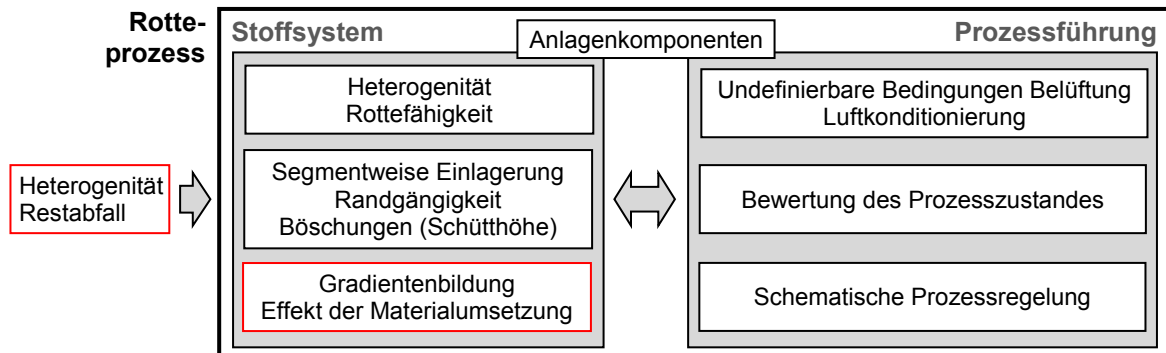


Abb. 8-2: Probleme statischer Rottereaktoren (Rote Umrandung: konzeptionsbedingt)

Die primäre Heterogenität des anfallenden Restabfalls ist unvermeidbar. Erfolgt in den der Rotte vorgeschalteten Arbeitsschritten keine Angleichung der Materialeigenschaften, weist auch das Rottegut Unterschiede in den Eigenschaften auf.

Mit der Heterogenität des Stoffsystems in der Makroebene sind u.a. Unterschiede bei der Durchströmbarkeit, der Wärmefreisetzung und beim Wassergehalt im Haufwerk verbunden. Eine hierauf angepasste, differenzierte Prozessführung ist in statischen Rottereaktoren nicht möglich. Die Rottefähigkeit stellt besonders bei Teilstromanlagen ein Problem dar. Der hohe Anteil an biologisch leicht abbaubaren Komponenten als potentielle Wärmequelle, der resultierende hohe Wassergehalt und eine hohe Schüttdichte (geringe Porosität) schränken die Durchströmbarkeit des Haufwerks ein. Dies hat Auswirkungen auf den Wärmehaushalt (Temperatur wird zu hoch) und den Wasserhaushalt (Wassersättigung).

Eine Reaktorbeschickung mit Radladern oder Schleuderbändern führt zu einer segmentweisen Einlagerung der Rottegutchargen. Erfolgt vor der Rotte kein Abbau der Heterogenität, werden sich das Haufwerk und das Betriebsverhalten entsprechend heterogen darstellen. Es kommt zur Ausbildung von stochastisch verteilten Vorzugsströmungswegen. Die breite Verteilung der Größe, Form und Dichte der Komponenten im Rottegut bewirkt bei einer Reaktorbeschickung mit Schleuderbändern zusätzlich eine ungewollte Separierung bestimmter Komponenten. Es bilden sich systematisch verteilte Vorzugsströmungswege in Form einer Randgängigkeit aus. Derartige strömungstechnische Effekte resultieren ebenfalls aus Unterschieden in der Schütthöhe wie sie bei Böschungen auftreten. Problematisch ist zusätzlich die Volumenreduzierung im Rotteschritt vor der Materialumsetzung, weshalb der neue Reaktor mit anderem Material aufgefüllt wird.

Die Belüftung führt unvermeidbar zur Ausweitung primärer Gradienten im Haufwerk. Darüber hinaus kommt es zur Ausbildung sekundärer Gradienten. Die in den Prozessablauf integrierte Umsetzung des Materials kann die Probleme nur teilweise lösen. Bestehende segmentweise Ungleichheiten (Heterogenität im Haufwerk) verlagern sich lediglich in den anderen Reaktor. Positive Effekte der Umsetzung beschränken sich auf die Verringerung einer Heterogenität innerhalb der Segmente örtlich über der Höhe. Eine notwendige großräumige Rückvermischung ist nicht erreichbar.

Das Luftsystem ist durch Sammelleitungen für Frischluft und Abluft gekennzeichnet. Die daraus resultierende Kopplung der Reaktoren führt zu abweichenden Zuständen bei der örtlichen Drucksituation im Leitungssystem. Von Bedeutung sind diese Probleme bei Reaktoren mit einer Umluftleitung und nicht absperrfähigen Stelleinrichtungen (z.B. Jalousieklappen). Es kommt zu Kurzschlussströmungen zwischen den Leitungen und zu einer Beeinflussung von Reaktoren untereinander. Die Folge sind zufällige Bedingungen für die Belüftung (Volumenstrom, Luftzusammensetzung) und eine unbewusste Prozessbeeinflussung durch den Eintrag von Falschluf in die Zuluft. Die Luftkonditionierung stellt ein weiteres Problem dar. Reaktorkonzepte mit Umluftleitungen ermöglichen den Einsatz von Misch- oder Umluft. Dies ist aufgrund der geringen oder nicht vorhandenen Sättigungslücke dieser Luft nur dann sinnvoll, wenn Kondensatoren die notwendige Kühlfähigkeit der Luft wieder herstellen. Darüber hinaus entstammt die Frischluft häufig anderen Anlagenteilen und erfüllt, aufgrund einer zu geringen Sättigungslücke, ihre Hauptaufgabe zur Wärmeabfuhr nicht.

Die genannten Probleme erschweren oder verhindern eine Bewertung des Prozesszustandes. Messungen im Haufwerk sind nur örtlich möglich, so dass eine große Beeinflussung durch eine vorliegende oder eine sich ausbildende Heterogenität besteht. Vorzugsmessstellen zur Charakterisierung des gesamten Haufwerks existieren nicht. Unterschiede in der Durchströmbarkeit des Haufwerks bestimmen die Abluftzusammensetzung und machen eine Bewertung der Abluftzustände nutzlos. Dadurch ist auch eine Bilanzierung des Prozesses ausgeschlossen.

Weil die tatsächlichen Bedingungen im Reaktor verborgen bleiben, kann keine zielgerichtete Prozessregelung erfolgen. Zugleich arbeitet die Regelung überwiegend schematisch, weshalb sie sich nur ungenügend an den wirklich vorliegenden und sich verändernden Prozesszuständen orientiert.

Die mechanische und chemische Belastung von Anlagenkomponenten in biotechnologischen Großanlagen ist sehr hoch. Die gewählten technischen und konstruktiven Lösungen werden den Anforderungen nur teilweise gerecht. Technische Ausfälle in der physikalischen Aufbereitung und beim Materialmanagement am Reaktor beeinträchtigen die Rotteprozesse indirekt zusätzlich.

8.2 Bewertung des Prozesszustandes

Die Vielzahl an Einflussfaktoren bei Rotteprozessen muss Auswirkungen auf das Behandlungsergebnis haben. Die Auswirkungen können nur durch eine Bewertung des Prozesszustandes und den Vergleich mit formulierten Ansprüchen transparent gemacht werden. Damit lassen sich zugleich mögliche Probleme von Stoffsystem und Prozessführung aufdecken. Außerdem können Anforderungen zur Ertüchtigung bestehender Anlagen abgeleitet werden. Die Abb. 8-3 zeigt die potentiellen Methoden zur Bewertung als Übersicht. Im Folgenden sollen die Kernaussagen bei Anwendung der Methoden, Einschränkungen infolge der vorliegenden Umstände und Schlussfolgerungen diskutiert werden.

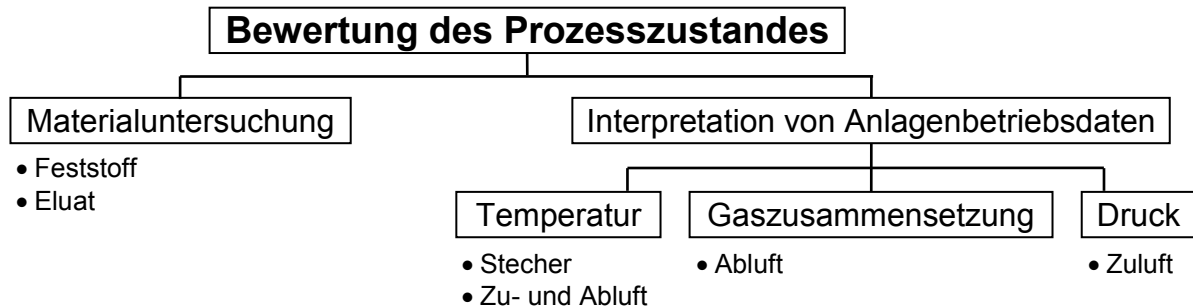


Abb. 8-3: Methoden zur Bewertung des Prozesszustandes in statischen Rottoreaktoren

Vor und nach dem Prozess sind Materialuntersuchungen möglich. Im Prozess ist eine Probenahme wegen des hohen Aufwandes und fehlender charakteristischer Stellen im Haufwerk ausgeschlossen, aber auch wegen der langen Analysezeit von Proben nicht praktikabel. Für eine kontinuierliche Bewertung muss der Prozess indirekt über das Betriebsverhalten der Rottoreaktoren und damit durch verfügbare Anlagenbetriebsdaten der Prozessüberwachung beurteilt werden. Eine deutliche Erweiterung der Messtechnik ist aufgrund fehlender Reaktionsmöglichkeiten im Prozess nicht sinnvoll.

Materialuntersuchung

Materialuntersuchungen sind u.a. zum Nachweis der Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte notwendig und basieren auf der Auswahl biologischer, chemischer oder physikalischer Analysemethoden. Für eine Beurteilung ist eine repräsentative Probenahme erforderlich. Untersuchungen des Reaktorinputs sind nur bei homogenem Material sinnvoll. Andernfalls sind die Ergebnisse nicht prozesscharakterisierend, weil eine Heterogenität des Inputs zu einem heterogenen Haufwerk im Reaktor führt, wodurch das Verhalten in der Rotte gravierend beeinflusst wird. In der Realität machen Untersuchungen des Reaktormaterials aufgrund der Vielzahl an stochastisch verteilten Chargen eine unrealistisch hohe Probenanzahl erforderlich. Untersuchungen kleiner Probemengen im Labormaßstab liefern aufgrund der Heterogenität und bei Vorliegen fundamentaler Probleme wie Vorzugsströmungen zufällige, die Realität nicht genügend genau beschreibende Ergebnisse.

Temperatur der Stecherthermometer

Die große Wärmekapazität der Schüttung von 3,2 kJ/(kg·K) bei Rottegut mit 65 % Wassergehalt [Kranert, 2010] bedingt eine prinzipielle Trägheit der Temperaturmessung. Weil die niedrige Geschwindigkeit biologischer Prozesse nicht zu einer schlagartigen Veränderung der Haufwerkstemperatur führt, ist der Einsatz dennoch geeignet. Änderungen auf der Zuluftseite lassen sich jedoch nur bei längerer Einwirkung im Haufwerk ermitteln. Zur Bewertung sind konstruktionsbedingte Fehler bei den Stecherthermometern (Wärmeleitung) durch eine thermische Isolation des Sensors vom Lanzenkörper auszuschließen. Für eine verbesserte Konstanz der Messdaten und zur Berücksichtigung des vertikalen Temperaturgradienten im Haufwerk sollte die Messstelle mittig bezogen auf die Haufwerkshöhe liegen.

Messungen durch Stecherthermometer stellen nur eine örtliche Situation dar. Weil keine Vorzugsmesspunkte zur Charakterisierung des gesamten Haufwerks existieren, werden stochastisch im Betrieb auftretende Unregelmäßigkeiten zufällig, nicht oder nur zum Teil

erfasst. Solche Unregelmäßigkeiten beruhen auf einer abweichenden biologischen Aktivität oder Durchströmbarkeit des Materials. Sie stellen sich folgendermaßen dar:

- Langsame Temperaturerhöhung zum Prozessstart
- Abweichender Temperaturanstieg bei Stopp der Belüftung in der Hauptrottephase

Eine langsame Erhöhung der Temperatur vom Start- auf das Zielniveau (Sollwert) deutet auf Probleme von Chargen bzgl. Zusammensetzung und Wassergehalt hin, wodurch die biologische Aktivität beeinträchtigt wird (vgl. Abb. 6-29 links, S. 99). Eine Unterbrechung der Belüftung in der Hauptrottephase führt zu einem Temperaturanstieg, der eine Bewertung zulässt. Ein signifikant abweichendes Verhalten der Stecher untereinander deutet auf die Existenz von Vorzugsströmungen hin (vgl. Abb. 6-23, S. 91). Bei einer starken Erhöhung wurde die Temperatur im Voraus durch eine stete Einwirkung eines Luftstroms (Vorzugsströmung) niedrig gehalten. Die Aktivität ist dabei normal oder hoch. Bei einer geringen Erhöhung lag keine Vorzugsströmung vor und die Aktivität des Materials ist vergleichsweise gering. Die Dauer der Unterbrechung ist zunächst durch Untersuchungen auf einen sinnvollen Wert festzulegen.

Werden im laufenden Betrieb signifikante Unterschiede zwischen den Stecherthermometern festgestellt, muss durch Neuplatzierung (schräges Einbringen) eine andere aber nahe liegende Stelle im Haufwerk untersucht werden, um die Störung als örtlich oder großräumig zu bewerten.

Systematische Unregelmäßigkeiten im Reaktor können durch Bestimmung des Mittelwerts bzw. Medians der jeweiligen Stechertemperatur mehrerer Rottedurchgänge aufgedeckt werden. Solche Unregelmäßigkeiten sind in der Abb. 8-4 dargestellt:

- Temperaturunterschiede über der Reaktorlänge (links)
- Temperaturniveau im Allgemeinen zu hoch oder zu niedrig (Mitte)
- Große Temperaturschwankungen bei gleichzeitig geringen Abweichungen der Temperaturniveaus untereinander (rechts)

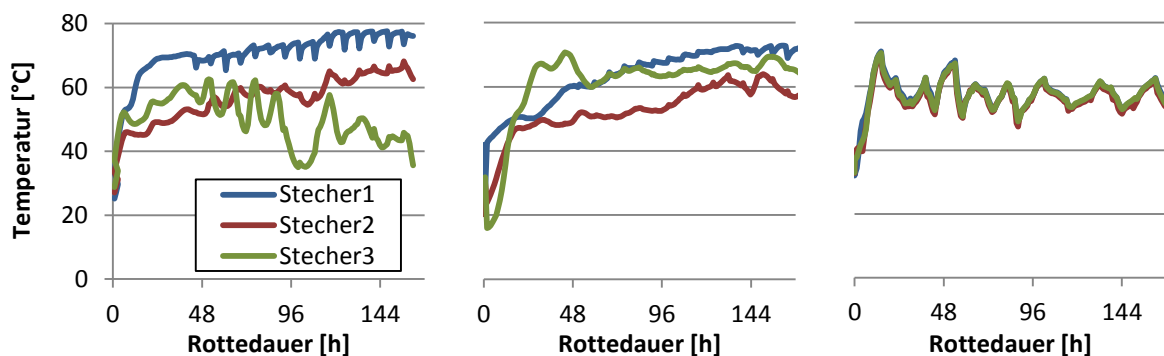


Abb. 8-4: Probleme aufgedeckt durch Stecherthermometer (GA 3, GA 6, TM 18)

Der erste Fall verdeutlicht eine Heterogenität bzgl. Durchströmbarkeit und/oder biologischer Aktivität im Haufwerk. Der zweite Fall zeigt entweder Mängel beim Stoffsystem (biologische Aktivität infolge Zusammensetzung), bei der Homogenität der Durchströmung (Vorzugsströmungen) oder beim Luftmanagement (Umluft-/Frischlufanteil). Im dritten Fall liegt eine falsche Parametrierung der Prozessregelung vor.

Temperatur der Zu- und Abluft

Die Temperatur der Zuluft muss im Regelbetrieb im Vergleich aller Messgrößen am niedrigsten liegen. Die Auswertung der Betriebsdaten 2010 der MBA-Anlage A bzgl. der Zulufttemperatur zeigte jedoch, dass die Werte sogar fast 19 % der gesamten betrachteten Rottedauer über der angestrebten Haufwerkstemperatur (Führungsgröße 55 °C) und damit zu hoch lagen. Eine derartige Größenordnung kann nur aufgrund eines Um- oder Mischluftbetriebes auftreten und ist aufgrund der begrenzten Kühlfähigkeit prozessrelevant. Hohe Werte können auf folgende Umstände hindeuten:

- Hohe Haufwerks- und damit Ablufttemperatur infolge
 - starker Wärmeproduktion und geringer Wärmeabfuhr
 - nicht erfasster Wärmequellen durch zu tief platzierte Stecherthermometer
- Umluftanteil in der Zuluft sehr hoch bzw. Frischluftanteil sehr gering
- Eintrag von Falschluf in die Zuluft

Die Werte der Abluft liegen aufgrund des Temperaturgradienten im Haufwerk gewöhnlich über allen anderen Messgrößen. Bei der Auswertung der Betriebsdaten 2010 erfolgte ein Vergleich mit den Werten der Stecherthermometer (vgl. Abb. A-8, S. 178). Die Ergebnisse zur Temperaturdifferenz ΔT zeigten sich folgendermaßen und lassen Schlussfolgerungen zu:

- $\Delta T < 5 \text{ K}$ (23 % aller Zustände) als Folge geringer biologischer Aktivität oder verringerter Ablufttemperatur durch Vorzugsströmungen
- $\Delta T > 5 \text{ K}$ (29 % aller Zustände) als Folge hoher biologischer Aktivität oder erhöhter Ablufttemperatur durch homogene Durchströmung oder unentdeckter Wärmequellen

In den übrigen Fällen verringerte sich eine anfängliche Abweichung zum Ende des Rotteprozesses, es bildete sich über der Rottedauer eine Abweichung aus oder es war keine Einordnung in Kategorien möglich. Dieser Zustand demonstriert die Verstärkung von Gradienten.

Gaszusammensetzung

Gasanalysen kennzeichnen im Bereich üblicher Rottebedingungen den Zustand aerober Prozesse am besten. Zudem sind spezielle Aussagen nur hiermit darstellbar. Dies gilt vor allem dann, wenn durch stochastisch auftretende Störungen die alleinige Temperaturmessung nicht ausreichend ist. Eine Bewertung bzgl. folgender Aspekte ist möglich:

- Anteil der aeroben Prozesse am Gesamtprozess und Fortschritt der Abbauvorgänge
- Auftreten von Falschlufteinträgen oder Vorzugsströmungen
- Qualitative Charakterisierung der Durchströmbarkeit

Eine Beurteilung der Gaszusammensetzung ist nur in Zuständen konstanter (bekannter) Belüftungsintensität und Zuluftwerte gegeben. Die Ansprüche werden an Anlagen mit Sammelleitungen und insbesondere mit Umluftleitungen nicht erfüllt. Die hieraus resultierenden Bedingungen lassen keinen Rückschluss auf den im Prozess verbrauchten Sauerstoff und damit keine stoffliche Prozessbilanzierung zu.

Praktisch würde die Summe von Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration bei Werten größer als 21 Vol.-% die Schlussfolgerung erlauben, dass CO_2 auch ohne Sauerstoffverbrauch

durch anaerobe Prozesse gebildet wurde. Allerdings ist der respiratorische Quotient¹⁹ substratabhängig und nicht zwangsläufig Eins. Dies gilt auch für komplex zusammengesetzte Substrate wie für Fraktionen aus Restabfall. In Versuchen mit MBA-Abfall lagen die Werte in der Abluft am Anfang um oder über 1, anschließend zwischen 0,6 und 1 und pendelten sich im weiteren Verlauf zwischen 0,6 und 0,8 ein, bevor sie zum Ende wieder anstiegen [Reinhardt, 1999]. Trotz dieser Komplexität in speziellen Fällen ermöglichen ermittelte Gaskonzentrationen immer eine Erfassung von Extremen der biologischen und strömungstechnischen Zustände. Dies gilt für Daten aus dem Haufwerk und eingeschränkt für Daten aus der Abluft.

Die Abluftzusammensetzung wird durch die Haufwerksstruktur entscheidend bestimmt. Bei einer Vorzugsströmung wird der Sauerstoffgehalt erhöht, bei einem Falschlufteintrag in den Reaktor verringert. In [Reinhardt, 1999] wurde das Milieu der Abluft von MBA-Rottegut maßgeblich von den sehr stoffwechselaktiven Bereichen innerhalb der Schüttung geprägt, obwohl diese räumlich und zeitlich begrenzt sind. Es lässt sich schlussfolgern, dass eine alleinige Nutzung der O₂-Konzentration zur Prozessbewertung nicht geeignet ist. Außerdem ist die Sauerstoffversorgung meist erfüllt, weil der Luftbedarf zur Wärmeabfuhr deutlich höher liegt.

Für eine Charakterisierung der Durchströmbarkeit und eine qualitative Bewertung der Gleichmäßigkeit der Durchströmung wären engmaschig Messungen im Haufwerk notwendig, was nur für Untersuchungen zur Optimierung geeignet ist. Als Kriterium gilt das Größenniveau der Konzentration. Hohe Werte an einer Messstelle im Vergleich zu anderen Regionen verdeutlichen eine schwächere Durchströmung. Niedrige entsprechend eine stärkere.

Druck

Das Prozessluftsystem stellt ein vernetztes System dar, da üblicherweise mehrere Reaktoren über Sammelleitungen gekoppelt sind. Dies führt zu einer instationären und örtlich abweichenden Drucksituation im Luftsystem, welche durch Umluftleitungen signifikant verstärkt wird. Dadurch werden die Förderleistung des Ventilators beeinflusst und Daten zum Druckverlust im Haufwerk nicht nutzbar. Andernfalls würde ein hoher Druck unter dem Haufwerk bei gleicher Ventilatorleistung auf eine schlechte Durchströmbarkeit hindeuten und ein Ansteigen über der Rottedauer auf den Einfluss der Setzung. Liegt bereits am Anfang ein vergleichsweise niedriger Druck vor, müssen Vorzugsströmungen im Haufwerk vorliegen. Eine Verringerung des Drucks während des Rotteprozesses ist die Folge einer sich intensivierenden Ausbildung von Vorzugsströmungen.

Zusammenfassende Darstellung zur Interpretation der Anlagenbetriebsdaten

Die Darstellungen zeigen, dass die Anlagenbetriebsdaten mehrere Interpretationen zulassen und zugleich deutliche Grenzen bzgl. ihrer Aussagen aufweisen. Zur Bewertung sind alle verfügbaren Messgrößen zu nutzen. Dennoch lassen sich nicht immer zweifelsfrei alle Bedingungen aufdecken. Folgende systematische Störungen können potentiell erfasst werden, wobei nicht in jedem Fall alle aufgeführten Kennzeichen auftreten müssen:

¹⁹ Verhältnis von abgegebenem CO₂ zu verbrauchtem O₂

- Inhomogene Durchströmung infolge von Vorzugsströmungen: Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Zuluft ist gering. Abluft weist vergleichsweise hohe Sauerstoffkonzentration auf. Die Stechertemperaturen sind uneinheitlich
- Geringe biologische Aktivität: Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Stechern ist gering. Die Aufwärmung in der Startphase dauert lang und eine Erwärmung bei Belüftungsstopp in der Hauptrottephase erfolgt langsam
- Unzureichende Wiedergabe des Wärmehaushalts im Haufwerk: Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Stechern ist groß
- Falschlufteintrag: Temperatur der Zuluft ist größer als die der Abluft bzw. als der Sollwert im Haufwerk. O₂-Konzentration der Abluft ist gering und dynamisch
- Falsche Parametrierung der Regelung: Große Schwankungen in den Temperaturen

8.3 Überblick zur Ertüchtigung in Betrieb befindlicher Anlagen

Die bisherigen Ausführungen verdeutlichten die Notwendigkeit zur Ertüchtigung von in Betrieb befindlichen Anlagen. Weil jede Behandlungsanlage an spezifische Umstände gebunden ist und einen unterschiedlichen Entwicklungsstand aufweist, sind nicht alle zu entwickelnden Lösungsansätze für jede Anlage relevant. Bestimmte Zusammenhänge liegen überall vor und lassen sich nicht beheben, während zusätzlich mit der konkreten technischen und betriebsorganisatorischen Ausführung Besonderheiten verbunden sind. Für eine Ertüchtigung ist selten die Anwendung nur einer speziellen Maßnahme ausreichend, vielmehr müssen strategisch alle Optionen geprüft werden. Kein Problem wird vollständig lösbar sein, die Umsetzung einzelner Schritte kann in Summe jedoch zu einer signifikanten Verbesserung führen. Weil nur wenige Möglichkeiten existieren, beim Betriebsverhalten auf festgestellte Abweichungen zum erwünschten Zustand zu reagieren, müssen Optimierungsmaßnahmen primär der Verhinderung solcher Abweichungen dienen.

Der Ansatzpunkt zur Entwicklung von Maßnahmen sind die in der Abb. 8-2 (S. 124) zusammenfassend dargestellten Probleme statischer Rottereaktoren. Sie wurden bereits als Themenblöcke gruppiert, denen die Abb. 8-5 eine passende Bezeichnung zuordnet. Damit sind zugleich die potentiellen Maßnahmenpakete für eine Ertüchtigung vorgegeben. Die konzeptionsbedingten (unvermeidbaren) Probleme sind nicht enthalten, weil für sie keine Lösungen entwickelt werden können.

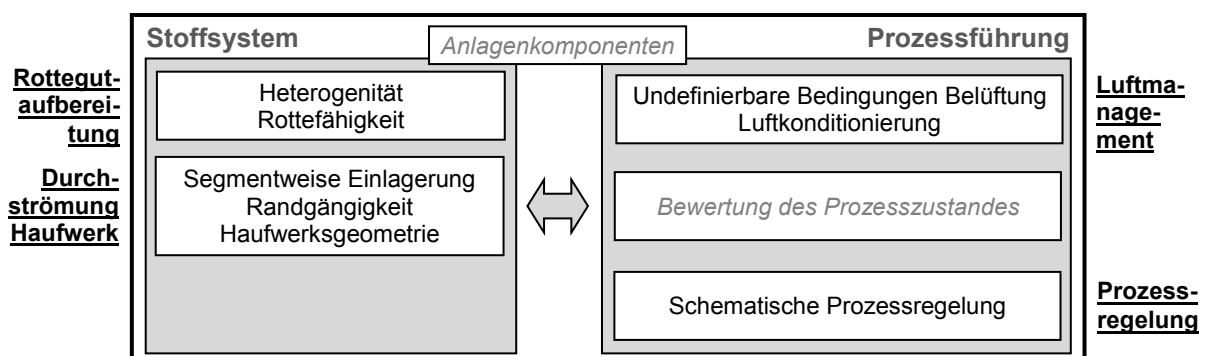


Abb. 8-5: Probleme statischer Rottereaktoren und Maßnahmenpakete zur Ertüchtigung

Die in grauer, kursiver Schrift dargestellten Probleme werden nicht diskutiert. Die Bewertung des Prozesszustandes war bereits Inhalt von Kapitel 8.2 (S. 125 ff.). Werden die Bedingungen im Haufwerk optimiert und undefinierbare Beeinflussungen durch das Luftsystem ausgeschlossen, verbessern sich auch die Möglichkeiten der Prozessüberwachung. Eine Auseinandersetzung mit der technischen Konfiguration der Anlagenkomponenten erfolgt nicht. Dies würde eine zu spezifische Betrachtung erfordern und ist nicht Inhalt der vorliegenden Arbeit. Es verbleiben vier Maßnahmenpakete mit folgender Priorität zur Realisierung:

1. Rottegutaufbereitung
2. Durchströmung des Haufwerks
3. Luftmanagement
4. Prozessregelung

Die Rottegutaufbereitung zur Konditionierung des Stoffsystems ist der entscheidende Schritt der gesamten Prozesskette. Defizite in den Eigenschaften des Stoffsystems lassen sich während der biologischen Behandlung nicht ausgleichen, da das Festbett mit seiner Struktur und Zusammensetzung zum bestimmenden Teil des Rottereaktors wird. Ersichtlich wurde das negative Betriebsverhalten von heterogenen Haufwerken, hervorgerufen durch die Heterogenität verschiedener Rottegutchargen und durch die fehlende Homogenisierung vor der Reaktorbeschickung. Anforderungen bestehen zudem an bestimmte physikalische und biochemische Bedingungen im Haufwerk. Als Maßnahmen sind zu diskutieren:

- Abbau der Heterogenität des Rottegutes
- Verbesserung der Rottefähigkeit

Bei der Durchströmung des Haufwerks haben sich Vorzugsströmungswege als negativ für das Betriebsverhalten gezeigt. Stochastisch verteilte Wege sind die Folge einer unzureichend realisierten Rottegutaufbereitung, so dass eine segmentweise Einlagerung des heterogenen Stoffsystems zur Heterogenität im Reaktor führt. Systematisch verteilte Wege treten in Form einer Randgängigkeit im Reaktor auf. Sie sind die Folge von Separierungseffekten bei der Reaktorbeschickung oder von vorliegenden Böschungen im Haufwerk. Auf beide Arten von Vorzugsströmungen muss reagiert werden. Die Ursachen können jedoch nur durch einen Umbau der Art der Reaktorbeschickung behoben werden. Die Zusammenhänge zur Durchströmbarkeit und zum Wärmehaushalt machen zudem eine Auseinandersetzung mit der Schütthöhe (Haufwerksvolumen) notwendig. Als Maßnahmen sind zu diskutieren:

- Begegnung der Heterogenität im Reaktor
- Begegnung der Randgängigkeit im Reaktor
- Umbau der Art der Reaktorbeschickung
- Anpassung der Schütthöhe

Beim Luftmanagement zeigten sich als wesentliche Probleme undefinierbare Bedingungen zur Belüftung und die Konditionierung der Zuluft (Kühlfähigkeit, Volumenstrom). Ursachen sind zufällige äußere Einflüsse (Drucksituationen) in Kombination mit baulichen Gegebenheiten (Sammelleitungen und Umluftleitung ohne Kondensator). Für eine zielgerichtete Prozessführung müssen die äußeren Einflüsse an jedem Rottereaktor ausgeschlossen werden. Die

Druckverhältnisse auf der Zuluft- und Abluftseite müssen stationär und die Druckdifferenz definiert gerichtet sein. Falschluf- bzw. Ausgleichsströmungen dürfen nicht auftreten und die Kühlfähigkeit muss gesteigert werden. Der dezentrale Einbau neuer Kondensatoren für die Umluft ist aufgrund der Investitionen und Platzverhältnisse an den Reaktoren ausgeschlossen. Als Maßnahmen sind zu diskutieren:

- Außerbetriebnahme der Umluftleitung
- Installation zusätzlicher Zentralventilatoren und Drucksensoren
- Trennung der Rottereaktoren von der Frischluft- und Abluftsammeleleitung

Die Prozessregelung beruht auf der Parametrierung der Stalleinrichtungen als ein Element zur zwar begrenzten, aber dennoch sichtbaren Rückwirkung auf den Prozess. Aufgrund der spezifischen Umstände kann die Diskussion nicht anhand einzelner Maßnahmen, sondern nur qualitativ erfolgen.

Die aufgeführten Maßnahmen zur Ertüchtigung sind nicht an allen Anlagen relevant. Es sind jeweils die konstruktiven Merkmale der Anlagen einzubeziehen, die in der Abb. 8-1 (S. 123) definiert wurden. Eine entsprechende Differenzierung wird in der anschließenden Diskussion vorgenommen. Die Abb. 8-6 zeigt die Zuordnung als Übersicht, wobei zusätzlich übergreifend relevante Maßnahmen zur Ertüchtigung ergänzt wurden. Innerhalb der Merkmalsgruppen sind die Maßnahmen entsprechend der oben festgelegten Priorität angeordnet.

Merkmalsgruppe	Maßnahmen zur Ertüchtigung	Aufwand	
<u>Stoffstromtrennung:</u> - Teilstrom	- Verbesserung Rottefähigkeit		o
<u>Reaktor- beschickung:</u> - Radlader - Schleuderband	- Abbau Heterogenität Rottegut	+	-
	- Begegnung Heterogenität im Reaktor - Begegnung Randgängigkeit - Umbau Art Reaktorbeschickung	+	-
<u>Luftsystem:</u> - Umluftleitung ohne Kondensator	- Außerbetriebnahme Umluftleitung		o
<u>Übergreifend:</u>	- Anpassung Schütthöhe - Installation Zentralventilatoren - Trennung von Sammeleleitungen - Anpassung Prozessregelung	+	- o -

Abb. 8-6: Konstruktive Merkmale statischer Rottereaktoren und Maßnahmen zur Ertüchtigung mit Einordnung nach dem Aufwand zur Realisierung (niedrig (-), mittel (o), hoch (+))

Die Erarbeitung von Lösungsansätzen zur Ertüchtigung wird durch bauliche Gegebenheiten und ökonomische Gesichtspunkte zum Teil stark begrenzt. Bestehende Anlagen haben noch eine Laufzeit von bis zu zehn Jahren, so dass Veränderungen möglich, mit großen Investitionen verbundene Umbauten am Stahlbetonbau der Reaktoren oder den Prinzipien der Beschickungs- und Leerungstechnologie aber nicht tragbar sind. Die Diskussion zu den Maßnahmen ist strukturiert bzgl. der jeweiligen Möglichkeit zur Realisierung. Die Realisierbarkeit ist in der Abb. 8-6 anhand des Aufwandes bewertet worden. Es ergibt sich folgende Einordnung:

- Ertüchtigung mit wenigen Umbauten (Kapitel 8.4)
- Ertüchtigung mit größeren Umbauten (Kapitel 8.5)

Im ersten Fall sind die Maßnahmen mit geringem oder mittlerem Aufwand und im zweiten Fall mit hohem aber möglicherweise noch vertretbarem Aufwand umsetzbar. Sie sind prozesstechnisch lohnenswert und technologisch realisierbar, können aber teilweise ökonomisch nicht tragbare Aufwendungen erfordern. Zur konkreten Beurteilung wäre eine anlagenspezifische Kalkulation erforderlich. Im Folgenden werden die jeweils zugeordneten Maßnahmen diskutiert, wobei die Reihenfolge innerhalb der Kapitel die festgelegte Priorität der Maßnahmenpakete widerspiegelt.

8.4 Ertüchtigung mit wenigen Umbauten

8.4.1 Abbau der Heterogenität des Rottegutes

Die Chargen der Restabfallfraktion besitzen starke Schwankungen in den Eigenschaften. Weil die segmentweise Einlagerung der Chargen in den Reaktor für das Betriebsverhalten problematisch ist, muss die Heterogenität des Stoffsystems vor der Reaktorbeschickung bestmöglich ausgeglichen werden. Entsprechende Maßnahmen sind insbesondere relevant, wenn die Reaktorbeschickung per Radlader oder Schleuderband erfolgt.

Aufgrund der Eigenschaften des Ausgangsmaterials und der Veränderungen im Rotteprozess ist folgende Differenzierung erforderlich:

- Maßnahmen vor dem ersten Rotteschritt
- Maßnahmen vor dem weiteren Rotteschritt

Maßnahmen vor dem ersten Rotteschritt

Der inkonstante Anfall des Abfalls macht stets eine Zwischenspeicherung am Beginn des Prozessablaufs erforderlich. Bei biologischen Behandlungsanlagen sind hierfür Flachbunker typisch. Eine gleichmäßige Anlagenbeschickung ist notwendig, um negative Auswirkungen in nachgeschalteten Aggregaten zu verhindern und eine schnelle Füllung des Reaktors zu erreichen. Unterbrechungen führen zu einer ungleich langen Liegezeit des Rottegutes im Reaktor und somit zu örtlich abweichenden Prozessbedingungen zum Startzeitpunkt durch Unterschiede bei Schüttdichten, biochemischen Bedingungen und Materialtemperaturen.

Für den Abbau der Heterogenität vor dem ersten Rotteschritt (im Folgenden als Homogenisierung bezeichnet) existieren zwei Varianten zur Integration in den Prozessablauf, die in der Abb. 8-7 dargestellt sind. In der Variante 1 erfolgt die Homogenisierung vor der physikalischen Aufbereitung und in der Variante 2 danach.

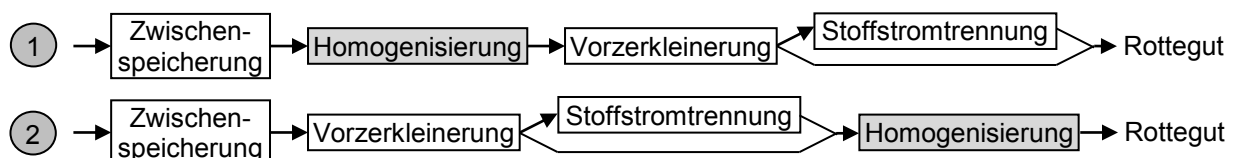


Abb. 8-7: Varianten zur Integration der Homogenisierung vor dem ersten Rotteschritt

Die Aufbereitung beinhaltet die Vorzerkleinerung und optional die Stoffstromtrennung bei der Teilstromanlage. Sie führt nicht zu einem Abbau der Heterogenität (vgl. 6.3.1, S. 78 ff.). Die

Einbindung der ggf. vorhandenen, nach der physikalischen Aufbereitung installierten Homogenisierstrommeln kann diese Aufgabe ebenfalls nicht erfüllen. Ursache ist die notwendige Größe der Trommeln vom Volumen eines Rottereaktors, die nicht annähernd vorliegt und auch durch eine Kapazitätserhöhung durch Konfigurationen (Füllstand, Staubleche) nicht erreicht wird. Neue Apparate sind vom Platz und den Investitionen ausgeschlossen.

Unter den Randbedingungen ist nur die Variante 1 umsetzbar. Weil eine Homogenisierung in Form einer Mischung als Eintrag von Mischungsenergie wirkt, würde es jedoch zu einer Verschlechterung der Trenngüte in der nachfolgenden physikalischen Aufbereitung kommen. Ursache sind die wirkenden Kräfte zwischen Abfallkomponenten und der hohe Wassergehalt der nativen Organik. Die nassen Komponenten werden bei der Aufbereitung durch den Eintrag mechanischer Energie auf andere Komponenten übertragen. Entsprechend unbefriedigend ist die Qualität der abgetrennten Stoffe, z.B. die Sauberkeit und Lagerfähigkeit. Besonders deutlich wird sich dies bei einer Teilstromanlage zeigen. Die Homogenisierung muss deshalb ohne zusätzlichen Eintrag von Mischungsenergie erfolgen.

Die Lösung ist die Integration in das Materialmanagement im Anlieferungsbereich der Anlage. Dazu ist die Festlegung anlagenspezifischer Richtlinien und Anweisungen erforderlich:

- Separate Zwischenspeicherung von Restabfall verschiedener Anliefergebiete
- Wechselweise Aufgabe des Restabfalls in den Vorzerkleinerer

Die separate Zwischenspeicherung begründet sich aus den Abweichungen bei der sammelgebietsspezifischen Zusammensetzung von Restabfall verschiedener Anliefergebiete (z.B. Stadtzentrum und Großwohnsiedlung; übrige Stadtbereiche; Land). Eine Möglichkeit zur Realisierung ist in der Abb. 8-8 (rechts) dargestellt. Die getrennt gespeicherten Abfälle werden entsprechend der anfallenden Mengenverhältnisse wechselweise in den Vorzerkleinerer der Restabfalllinie aufgegeben. Die Nutzung von jeweils nur einem der getrennt gespeicherten Abfälle scheitert sowohl an den zu geringen Mengen, die eine Reaktorfüllung an einem Tag ausschließt, als auch einer ggf. mangelhaften Rottefähigkeit.

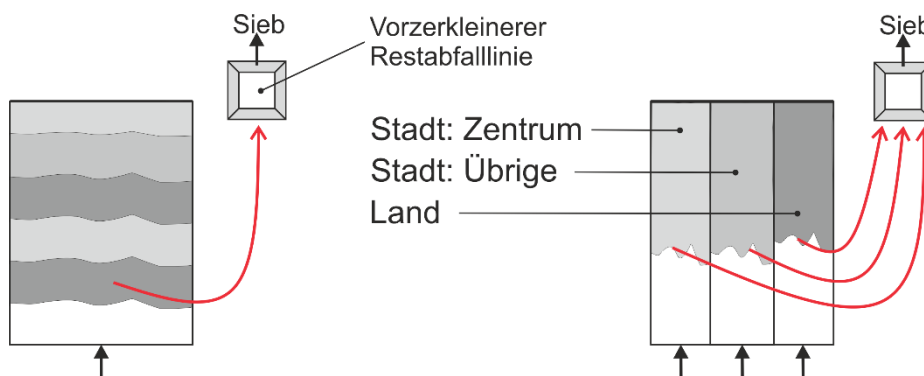


Abb. 8-8: Materialmanagement im Anlieferungsbereich einer MBA-Anlage im Istzustand (links) und als Ertüchtigungsmaßnahme zur Homogenisierung (rechts)

Zum Vergleich zeigt die Abb. 8-8 (links) das Materialmanagement im Istzustand. Durch die Ertüchtigungsmaßnahme der wechselweisen Beschickung ergeben sich folgende Vorteile:

- Definierter Prozessschritt zur Angleichung der Eigenschaften
- Verhinderung großräumig vorliegender Rottegutchargen im Reaktor

Während der Abfall im Istzustand der physikalischen Aufbereitung zufällig nach Anfallzeitpunkt zugeführt wird und sich je nach Materialmenge entsprechend großräumig im Reaktor einlagert, ergeben sich durch die Ertüchtigungsmaßnahme Möglichkeiten zur definierten Homogenisierung. Die mit einem Polypgreifer zur Beschickung aufnehmbare Materialmenge ist mit etwa 1,5 m³ gering und es werden durch die üblicherweise angeschlossene Stoffstromtrennung nochmal etwa 40 bis 50 % der Masse und damit annähernd ein ebensolches Volumen entfernt. Deshalb können die resultierenden Effekte der wechselweisen Materialaufgabe im Reaktor vermutlich vernachlässigt werden. Ein Ausgleich der Schwankungen in den Eigenschaften wäre durch eine zusätzliche Mischung direkt vor der Rotte möglich. Die Aggregate können klein ausfallen, so dass bestehende Homogenisierungstrommeln genutzt werden könnten. Damit wären zwei Schritte der Homogenisierung umsetzbar, ohne zusätzliche technische Einrichtungen zu benötigen.

Maßnahmen vor dem weiteren Rotteschritt

Eine Heterogenität im Reaktor kann auch das indirekte Ergebnis des Rotteverlustes und einhergehender Veränderungen in der Struktur des Rottegutes sein. Zur Kompensation der Volumenverringerung werden die Reaktoren im zweiten Rotteschritt mit Material aus dem ersten Schritt aufgefüllt. Aufgrund der abweichenden Eigenschaften des Materials ergeben sich entsprechende Auswirkungen auf das Betriebsverhalten. Zur Lösung des Problems sind folgende Maßnahmen möglich:

- Auffüllen des Reaktors mit Umtrags- oder Austragsmaterial anderer Reaktoren
- Verringerung der Schütthöhe im zweiten Rotteschritt

Der Einsatz von Umtragsmaterial eines anderen Reaktors verspricht aufgrund vergleichbarer Eigenschaften eine Verbesserung. Eine Anwendung ist dennoch ausgeschlossen, weil durch die Entnahme von Material das Volumen des verbliebenen Restes noch geringer wird und damit Probleme bei dessen zweiten Rotteschritt auftreten. Außerdem wäre eine Synchronisierung der Beschickungs- und Leerungstakte der Reaktoren erforderlich, womit Auswirkungen auf die notwendige Flexibilität im betrieblichen Alltag verbunden sind. Das Vorhalten von Umtragsmaterial in einem Reaktor scheidet aus, da dieses lange unbelüftete Liegezeiten hätte und der Aufwand im Stoffstrommanagement zu groß wäre. Der Einsatz von Austragsmaterial ist vom Materialfluss in der Anlage möglich und aufgrund der Eigenschaften vermutlich geeignet, stellt aber keine optimale Lösung dar. Erforderlich wäre eine Synchronisierung der Beschickungs- und Leerungstakte der Reaktoren. Außerdem muss erst untersucht werden, inwiefern sich die verbliebenen Differenzen zum Umtragsmaterial in den stofflichen und strömungstechnischen Eigenschaften des Materials im Betrieb zeigen.

Varianten ohne zusätzlichen Materialbedarf vereinfachen das Stoffstrommanagement erheblich und sind zu bevorzugen. Die Nutzung von kleineren Rottereaktoren scheint theoretisch möglich (Verkürzung z.B. durch den Einbau einer Rückwand), schränkt die betriebliche Flexibilität an der Anlage aber stark ein und scheidet damit aus. Eine problemlos umsetzbare Variante ist die manuelle Verringerung der Schütthöhe im zweiten Rotteschritt. Die Festlegung der notwendigen Schütthöhe an den tatsächlichen Volumenverlust muss auf Erfahrungswerten beruhen.

8.4.2 Verbesserung der Rottefähigkeit

Die Rottegutaufbereitung muss sich daran orientieren, das Stoffsystem rottefähig zu machen. Die Rottefähigkeit wird in jedem Rotteguthaufwerk bestimmt durch:

- Physikalische Bedingungen
- Biochemische Bedingungen

Der erste und wesentliche Aspekt beruht auf den physikalischen Eigenschaften des Stoffsystems. Von Einfluss sind insbesondere die Durchströmbarkeit, der Wassergehalt, die Schüttdichte, das Setzungsverhalten und der Anteil biologisch leicht abbaubarer Komponenten auf Basis der stofflichen Zusammensetzung.

Der zweite Aspekt beruht auf den biochemischen Eigenschaften des Stoffsystems. Bei Fraktionen aus Restabfall stellt sich das Spektrum an Mikroorganismen aufgrund der stofflichen Zusammensetzung entsprechend vielfältig dar. Es muss aus diesem Grund, im Gegensatz zur Kompostierung von Bioabfall (z.B. Pufferung von Säuren), auch keine Anpassung durch Zugabe anderer Stoffarten erfahren. Zur Verbesserung der Rottefähigkeit ist nur eine Anpassung der physikalischen Bedingungen notwendig. Entsprechende Maßnahmen sind insbesondere bei Anlagen mit dem konstruktiven Merkmal einer Teilstromanlage relevant.

Ein Stoffsystem ist rottefähig, wenn es aerob biologisch abbaubar ist. Die Rottefähigkeit ist unter folgenden Umständen gegeben:

- Gleichmäßig durchströmbar, schütt- und rieselfähig
- Haufwerksstruktur mit ausreichend großem Luftporenvolumen
- Wassergehalt im saugfähigen Anteil maximal 50 Ma.-%
- pH-Wert im neutralen Bereich und Nährstoffverhältnis (C/N-Verhältnis) 20/1 bis 35/1

Die volumenspezifische Wärmeproduktion muss so gering bzw. die Belüftungsintensität ausreichend hoch sein, dass überschüssige Wärme abgeführt werden kann. Die Haufwerksstruktur muss einen ausreichend hohen Luftporenanteil gewährleisten, so dass sich die Wärmeproduktion verringert und die Durchströmbarkeit verbessert. Der Wassergehalt ist so einzustellen, dass ausreichend Wärme mittels Verdunstung abgeführt wird und kein Presswasser anfällt. Folgende Maßnahmen zur Umsetzung sind möglich:

- Anhebung des Siebschnitts
- Einsatz von Zuschlagstoffen
- Umstellung der Art der Bewässerung

Anhebung des Siebschnitts

Eine Anhebung des Siebschnitts durch eine größere Maschenweite kann bei bestehenden Siebmaschinen mit polygoner Siebtrommel durch Austausch der Siebbleche problemlos umgesetzt werden. Bei Rundsiebtrommeln muss die Trommel gewechselt werden. Der positive Effekt ist eine Verbreiterung der Partikelgrößenverteilung im Rottegut, weil auch größere Partikel in den Siebdurchgang gelangen. Der Wassergehalt des Rottegutes wird sich reduzieren, weil insbesondere die kleinen und damit organischen Komponenten Träger des Wassers sind.

Damit sind folgende Auswirkungen verbunden:

- Verbesserung der Durchströmbarkeit
- Menge an Organik bleibt absolut gleich, nimmt aber relativ im Volumen ab

Nachteil ist die sich zwangsläufig verringernde Menge an ausgeschleusten Wertstoffen. Um diese zurückzugewinnen, müsste sich an die biologische Stufe eine physikalische Aufbereitung mindestens in Form einer Siebung anschließen. Teilweise ist der Schritt an bestehenden Anlagen vorgesehen, andernfalls muss der Verlust an Wertstoff für die verbesserte Rottefähigkeit hingenommen werden. Die Auswirkungen auf die Ablagerungsfähigkeit durch die verminderte Ausschleusung heizwertreicher Stoffe müssten konkret untersucht werden.

Die pauschale Festlegung einer bestimmten Siebweite ist ausgeschlossen, weil stets die konkrete standortspezifische Situation (Zusammensetzung Restabfall) ausschlaggebend ist. Entscheidend ist die Wirkung der Organik als Wärmequelle und deren Beitrag zum Wasserhaushalt. Prinzipiell muss die Siebweite umso höher liegen, je größer der Organikanteil im Ausgangsmaterial ist, weil damit auf beide Aspekte positive Effekte erzielt werden. Die Lochgröße ist nach oben begrenzt, weil alle flächigen Komponenten und (hohle) Grobgüter entfernt werden müssen. Die beispielhafte Partikelgrößenverteilung in der Abb. 4-3 (S. 29) zeigte, dass im 80 mm Siebdurchgang etwa 80 % der gesamten Organik enthalten ist und sich gleichzeitig ein größerer Anteil der übrigen Fraktionen im Feingut befindet. Diese Siebweite wird in den Anlagen nur vereinzelt genutzt und kann damit eine mögliche Zielgröße darstellen.

Einsatz von Zuschlagstoffen

Der Einsatz von Zuschlagstoffen im Rottegut ist unter dem Begriff der Strukturierung aus der Kompostierung bekannt und kann aufgrund analoger Grundprozesse auch bei der Restabfallbehandlung Anwendung finden. Um die gewünschten Wirkungen zu erzielen, muss der Zuschlagstoff folgende Merkmale aufweisen:

- Gute Verfügbarkeit an der Anlage
- Ausreichend hohe mechanisch stabile Struktur
- Geringer Wassergehalt ($\leq 5\%$)
- Nahezu frei von leicht abbaubaren biogenen Komponenten
- Hydrophiles Verhalten bei hohem spezifischen Wasseraufnahmevermögen

Der Einsatz verlangt beim Stoffstrommanagement in der Anlage bestimmte Voraussetzungen, um mindestens eine teilautomatisierte Zugabe zu ermöglichen. Zugleich müssen mögliche Probleme einer Staubentwicklung bei Transport und Zugabe dieser Stoffe berücksichtigt werden. Die Möglichkeiten zur Einflussnahme in MBA-Anlagen begrenzen sich auf den Einsatz der Feinfraktion der Sperrmülllinie, weil für die Grobfraktion ein Markt besteht. Das Stoffsystem weist die festgelegten Merkmale auf, macht aufgrund eines ungleichmäßigen Anfalls jedoch eine größere Zwischenspeicherung notwendig.

Der positive Effekt einer Beimischung solcher Zuschlagstoffe ($< 40\text{ mm}$) konnte an der MBA-Anlage B in Voruntersuchungen nachgewiesen werden. Die Tab. 8-1 zeigt die Eckdaten und Ergebnisse.

Tab. 8-1: Ergebnisse von Untersuchungen zur Durchströmbarkeit strukturierten Rottegutes

Datum Start	Material	Wassergehalt x [%]	Schüttdichte ρ_{Sch} [kg/m ³]	R_L , t=0 h [Pa s/m ²]	R_L , t=144 h [Pa s/m ²]
16.07.	Eintrag	50,6	784	16210	52093
25.07.	Eintrag	53,9	888	27271	¹⁾
06.08.	Mischgut Anlage	52,1	648	10107	18681
12.08.	Mischgut Anlage	51,3	674	9466	16667
21.08.	Mischgut Anlage	51,2	736	11121	26703
26.08.	Mischgut ²⁾ 1:5	52,4	705	10981	21979
01.09.	Mischgut ²⁾ 1:10	47,1	660	10325	18757

¹⁾ vorzeitiger Abbruch wegen Presswasseraustritt; ²⁾ manuell (Strukturmateriel : Rottegut)

Dabei bezeichnet „Mischgut Anlage“ eine relativ undefinierbare Zugabe des Zuschlagstoffs zur Restabfallfraktion (Eintrag) über interne Förderbänder. Für das Mischungsverhältnis wurde vom Anlagenpersonal ein Teil Sperrmüll und fünf Teile Restabfall geschätzt (1:6). Aus dem Mischstoffstrom wurde das Versuchsmaterial entnommen. Hieran schlossen sich zwei Versuche mit manuell präpariertem Mischgut beider Fraktionen an. Das Mischgut wurde analysiert (Wassergehalt, Schüttdichte) und mit der Durchströmsäule untersucht. Die Untersuchungen zeigten folgende Ergebnisse:

- Verringerung der Schüttdichte verglichen mit nicht konditioniertem Rottegut
- Verringerung des spezifischen Durchströmwiderstandes
- Unklare Verhältnisse beim Wassergehalt

Die verringerte Schüttdichte ist Folge der geringen Dichte des Zuschlagstoffs. Die Effekte bei der Durchströmbarkeit müssen aus einer strukturellen Veränderung resultieren. Der Zuschlagstoff besitzt einen geringen Wassergehalt, so dass die native Organik durch die Mischung einen „krümeligen“ Charakter erhält und sich auf den Oberflächen der zusätzlichen Komponenten ablagern kann. Dies spiegelt sich in der Durchströmbarkeit wider, während sich Effekte beim Wassergehalt der Mischung aufgrund der geringen Dichte des Zuschlagstoffs nicht zwangsläufig in Messdaten zeigen. Die nicht eindeutigen Ergebnisse zum Einfluss des Wassergehaltes auf die Durchströmbarkeit wurden bereits an anderer Stelle diskutiert (vgl. 6.2.2, S. 72 ff.). Dennoch ist von einer Verbesserung bzgl. der Haufwerksstruktur auszugehen, weil ein Presswasseranfall nicht oder stark vermindert festgestellt wurde.

Der Einsatz von Zuschlagstoffen richtet sich nach dem Umfang der Heterogenität des Stoffsystems. Eine rein schematische Zugabe kann nicht zum Erfolg führen. Es würde sich zwar der Zustand kritischer Chargen verbessern, ebenso verändern sich aber auch die Eigenschaften der übrigen Chargen. Eine Heterogenität als ein Unterschied untereinander, würde in weiten Bereichen bestehen bleiben. Die Zumischung sollte auf als kritisch erkannte Chargen beschränkt werden. Ausschlaggebend sind hierbei folgende Informationen:

- Folgen die Eigenschaften der angelieferten Restabfälle zufälligen und/oder systematischen Schwankungen (Wochen-, Tagesgangkurve)?
- Zeigen sich vor der Rotte positive Resultate von Maßnahmen zum Abbau der Heterogenität?

Erst Informationen dieser Art ermöglichen zielgerichtete Maßnahmen für eine Optimierung. Dabei muss die Beurteilung des Stoffsystems durch Hilfsgrößen erfolgen, weil die Rottefähigkeit eine integrale Eigenschaft verschiedener Parameter darstellt und nicht direkt (online) bestimmt werden kann. Praktikabel sind hierbei die gemeinsame Ermittlung von Schüttdichte und Wassergehalt.

Die Realisierung einer Zumischung kann sich an den Anlagen als praktisches Problem darstellen, weil eine definierbare und jeweils zielgerichtete Zugabe von Stoffen zum Rottegut nicht immer möglich ist. Ursachen sind:

- Stark schwankende und unklare Rotteguteigenschaften
- Unstetige Massenströme an Rottegut und Zuschlagstoff

Die Heterogenität der Abfallchargen zeigt sich beispielsweise darin, dass ein hoher Wassergehalt oder ein hoher Anteil an mineralischen Komponenten zum selben Massenstrom führen. Online-Messmethoden zur Charakterisierung existieren nicht. Auch die Gleichmäßigkeit der Materialaufgabe in den Vorzerkleinerer beeinflusst den Stoffstrom. Die Bereitstellung der Zuschlagstoffe kann aus apparatetechnischen Gründen ebenfalls unstetig sein, weil die Füllhöhe im Apparat (statischer Druck im Bunkerband) die ausgetragene Menge beeinflusst. Große Transportbandlängen und wenige Bandwaagen im Anlagensystem lassen keine direkten Reaktionen auf eine inkonstante Bandbelegung zu. Die Bedingungen führen dazu, dass bekannte Massenströme als Voraussetzung für eine zielgerichtete Strukturierung nicht gegeben sind. Dennoch lassen sich besonders kritische Chargen verbessern, wenn folgende Aspekte beachtet werden:

- Abbau der Heterogenität der Anlieferchargen vor dem Vorzerkleinerer samt einer gleichmäßigen Materialaufgabe
- Optimierung des Einsatzes der Zuschlagstoffe über iterative Versuche

Die diskutierten Maßnahmen zur Verbesserung der Rottefähigkeit (Siebschnitt, Zuschlagstoff) sind unvermeidbar mit einer Vergrößerung des Haufwerksvolumens verbunden. Damit geht nicht zwangsläufig eine verringerte Anlagenkapazität einher. Ein Ausgleich wäre durch verbesserte Prozessergebnisse und die resultierende verkürzte Behandlungsdauer möglich. Quantitative Aussagen erfordern großtechnische experimentelle Untersuchungen. Die Auswirkungen der verbreiterten Partikelgrößenverteilung im Stoffsystem sind hierbei eine wesentliche Fragestellung. Abhängig von der Art der Reaktorbeschickung kann dadurch die Ausbildung einer Randgängigkeit befördert werden. Die Ausarbeitungen im folgenden Kapitel werden aber zeigen, dass diesem Problem mit Maßnahmen begegnet werden kann.

Umstellung der Art der Bewässerung

Der hohe Anteil biogener und damit feuchter Komponenten im Rottegut führt normalerweise zu einem ausreichend hohen Wassergehalt. Bei manchen Chargen und gerade bei Umtragsmaterial kann eine Erhöhung dennoch erforderlich sein. Eine Wasserzugabe im Rotteaktor ist auszuschließen, weil für diese Methode keine Vorteile erkennbar sind (vgl. 6.4.3, S. 102 f.). Vorhandene Bewässerungsdüsen können deinstalliert werden, weil die Bewässerung außerhalb des Reaktors erfolgen muss.

Die Gründe sind:

- Material liegt auf Bandsystemen vereinzelt und in geringer Schichthöhe vor
- Spezifische Bewässerung möglich

Der vorhandene Wassergehalt kann berücksichtigt und die Wasserzugabe darauf angepasst werden. Bei einer schematischen Wasserzugabe tritt dagegen schnell eine Wassersättigung ein. Als Führungsgröße steht dabei die Materialmasse bereit (vgl. Zusammenhang Schüttdichte (Masse) und Wassergehalt in Abb. 6-7, S. 73). Beispielsweise lässt ein geringer Massenstrom einen geringen Wassergehalt erwarten. Jedoch ist der Einsatz infolge der unsteten Massenströme und Eigenschaften sowie aufgrund fehlender Methoden zur Schnellbestimmung des Wassergehaltes mit Ungenauigkeiten verbunden. Insbesondere bei einem Rottegut mit ausgeglichenen Eigenschaften (durch Abbau der Heterogenität vor der physikalischen Aufbereitung) und bei einer gleichmäßigen Beschickung der Vorzerkleinerer sind jedoch gute Ergebnisse möglich.

8.4.3 Begegnung der Randgängigkeit im Reaktor

Die Randgängigkeit ist eine systematisch auftretende Vorzugsströmung in den Randbereichen des Haufwerks. Sie kann folgendermaßen auftreten:

- An den Wänden und am Boden des Haufwerks (vgl. Abb. 6-20, S. 88)
- An den Böschungen des Haufwerks (vgl. Abb. 6-21, S. 89)

Der erste Fall ist insbesondere bei Anlagen relevant, bei denen die Reaktorbeschickung per Schleuderband erfolgt. Der zweite Fall ist die Folge einer Reaktorbeschickung per Radlader oder Schleuderband. Beide Fälle können einzeln oder gemeinsam auftreten.

Bei Anlagen mit den genannten Merkmalen müssen Maßnahmen zur Verhinderung der Vorzugsströmungen umgesetzt werden. Die Aufgabe der Optimierung besteht darin, ein gleichmäßiges Strömungsfeld über dem Reaktorquerschnitt und über der Reaktorlänge zu erreichen. Die Abb. 8-9 zeigt die Lösung links im Querschnitt und in der Mitte im Längsschnitt.

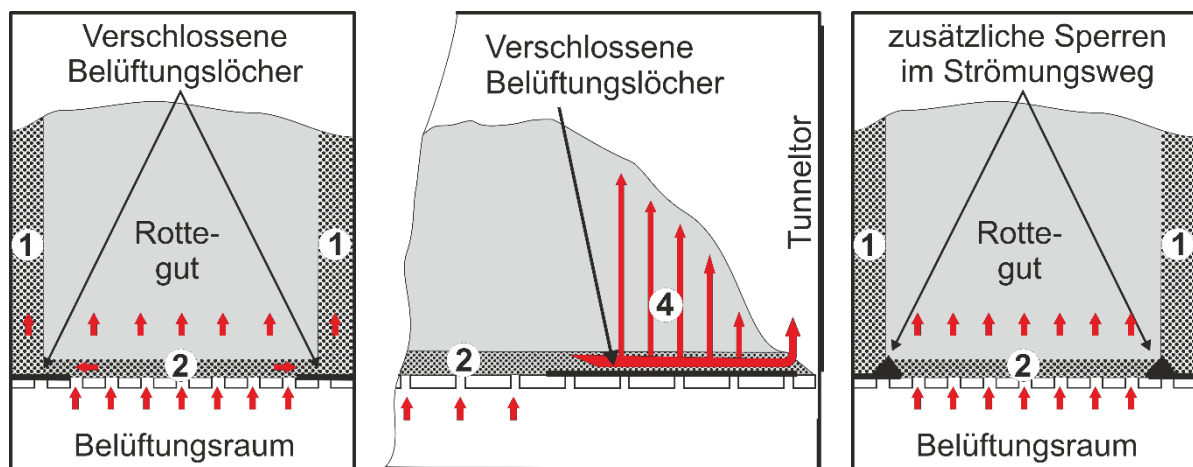


Abb. 8-9: Begegnung der Randgängigkeit im Rottereaktor: Reaktorquerschnitt (links), Reaktorlängsschnitt am Tunneltor (Mitte), Reaktorquerschnitt erweiterte Variante (rechts)

Am Belüftungsboden werden die Belüftungslöcher an den Wänden über der gesamten Reaktortlänge verschlossen. Im Bereich der Böschungen erfolgt ein Verschließen über der gesamten Reaktorbreite. Mit der Maßnahme treten folgende Effekte auf:

- Haufwerksbereiche über den verschlossenen Belüftungslöchern werden einer direkten Vorzugsströmung zwischen Belüftungs- und Abluftraum entzogen
- Erhöhung des Anströmdrucks an den unmodifizierten Bereichen

Weil Luft nicht mehr direkt vom Belüftungsraum in die Randbereiche (Wand und Böschung) gelangt, wird ein teilweises Umströmen des Haufwerks verhindert. Die gleichgroßen Pfeile zeigen eine Homogenität über dem Querschnitt als positiven Effekt auf das Strömungsfeld im Reaktor. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Gradienten wird sich örtlich angleichen und ein signifikanter Unterschied zwischen den Rand- und übrigen Bereichen aufgrund angeglicher Strömungsgeschwindigkeiten abgewendet. Zugleich erhöht sich der Anströmdruck an den Kernbereichen des Haufwerks. Dadurch wird auch Material mit einem hohen spezifischen Durchströmwiderstand stärker durchströmt und mehr Wärme abgeführt. Ermöglichen die Bedingungen eine Verringerung der Belüftungsintensität, liegen für eine vorübergehende Notwendigkeit einer Steigerung entsprechende Reserven vor, die es vorher nicht gab. Hieraus resultieren zudem Einsparungen bei den Betriebskosten (Ventilatorleistung und Abluftreinigung).

Die Auswirkungen einer modifizierten Anströmfläche wurden an der MBA-Anlage A untersucht und die Effekte bestätigt. Hierzu wurden die Belüftungslöcher torseitig auf einer Länge von 2,90 m und ventilatorseitig auf einer Länge von 2 m jeweils über der gesamten Breite verschlossen (durch Ausbleiben der Reinigung). Für jeden Rottetunnel wurde der Median der Stecher berechnet und die Werte vor der Modifizierung (Betriebsdaten 2009) in der Abb. A-4 (S. 174) sowie nach der Modifizierung (Betriebsdaten 2010) in der Abb. A-5 (S. 175) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen:

- Verringerung des Temperaturniveaus der Stecherthermometer
- Verringerung der Unterschiede im Temperaturniveau der Stecherthermometer untereinander

Aufgrund der positiven Ergebnisse wurde die Modifizierung am Belüftungsboden unter den Böschungen in den regulären Anlagenbetrieb übernommen.

In weiteren Untersuchungen wurde ergänzend ein Verschließen von Belüftungslöchern an den Wänden durchgeführt. Durch das Auslegen von 1 m breiten, starken Folien auf dem Boden reduzierte sich die Belüftungsfläche insgesamt um etwa 40 %. Der erhöhte Anströmdruck und die verstärkte Durchströmung der verbliebenen Bereiche konnte unter den üblichen Betriebsbedingungen (Ventilatorleistung 50 bis 75 %, Öffnungsgrad Frischluftklappe 10 bis 50 %) qualitativ nachgewiesen werden. Nur bei diesen Versuchen traten teilweise örtliche CO₂-Konzentrationen nahe Null auf, im Vergleich zu sonst etwa 2 Vol.-%. Die Abb. 8-10 zeigt exemplarisch den Ausschnitt einer Messreihe. Eine quantitative Beurteilung ist aufgrund der Rückwirkungen der Zuluftzusammensetzung mit der Drucksituation im Luftsystem nicht möglich.

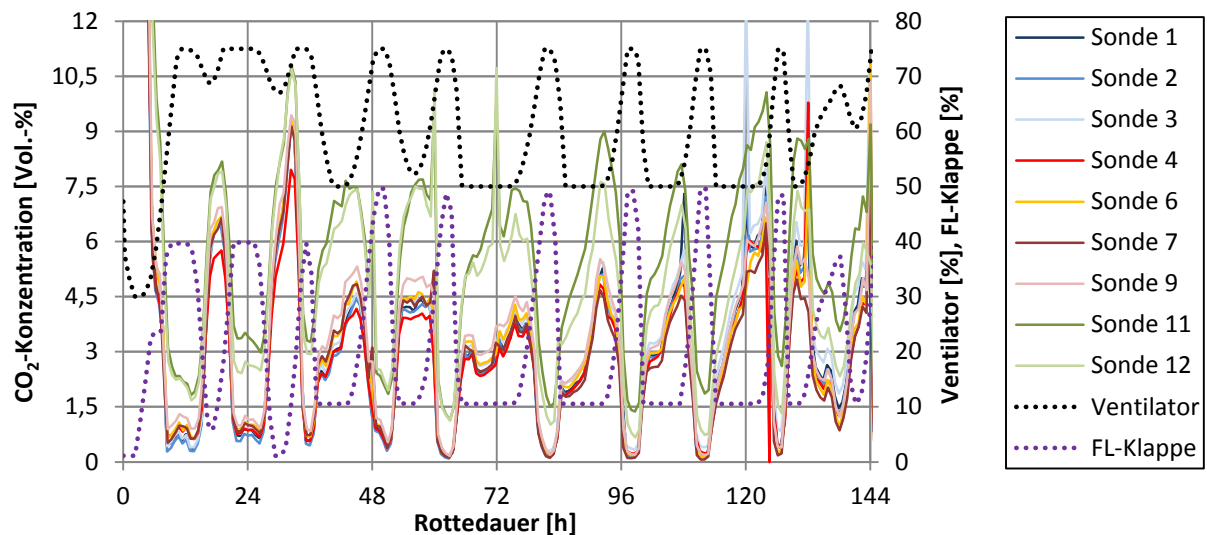


Abb. 8-10: Betriebsverhalten mit modifiziertem Belüftungsboden (Ausschnitt GA 15)

Die konkreten Auswirkungen von Modifizierungen am Belüftungsboden auf das Strömungsfeld im Haufwerk sind von der Größe der modifizierten Bereiche abhängig. Erfolgt das Verschließen zu großräumig, kann es in den darüber liegenden Bereichen infolge ungenügender Durchströmung zu einer verringerten Wärmeabfuhr kommen. Dieser Umstand muss an den Anlagen individuell überwacht werden und wird von folgenden Effekten bestimmt:

- Verteilung der Luft im Kern des Haufwerks
- Randgängigkeitszone 2 am Reaktorboden

Innerhalb eines durchströmten Haufwerks kommt es zu einer Verteilung der Luft auch senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, weil die Luft bei jedem angeströmten Partikel zu beiden Seiten ausweicht. Bekannt ist dieser Mechanismus in der Wärme- und Stoffübertragung unter dem Begriff der dissipativen Quervermischung. Weil sich diese mit der Strömungsgeschwindigkeit erhöht, führt ein gesteigerter Anströmdruck zu einer entsprechend stärkeren Verteilung. Probleme für die Sauerstoffversorgung sind aus diesem Grund nicht zu erwarten. In der Optimierungsphase muss deshalb insbesondere der Wärmehaushalt betrachtet werden. Großräumige Überhöhungen in der Haufwerkstemperatur sind zu verhindern.

Die Randgängigkeitszone 2 am Reaktorboden stellt eine Verbindung zur Zone 1 an den Wänden dar. Dies führt zu einem Teilluftstrom in Richtung der Wände, der auch durch das Verschließen der Belüftungslöcher nicht verhindert wird (vgl. Abb. 8-9 links). Dadurch treten zusätzliche Belüftungseffekte in den Bereichen über den modifizierten Flächen auf. Die Effekte lassen sich nur qualitativ beschreiben, weil sich die Bedingungen in jedem Haufwerk unterscheiden und der Teilluftstrom messtechnisch nicht erfasst werden kann. Ähnliche Effekte zeigen sich im Bereich der Böschungen mit einer Vorzugsströmung Richtung Haufwerksende. Sie führen zu einer vertikalen Durchströmung der Randgängigkeitszone 4 am Reaktortor (vgl. Abb. 8-9 (Mitte)) und der Zone 3 auf der Ventilatorseite. Die Auswertung der Betriebsdaten 2010 und der Vergleich mit den Daten 2009 bestätigte die Effekte. Die Modifizierungen führten zwar zu einer Verringerung der Unterschiede zwischen den Stechertemperaturen untereinander (vgl. Abb. A-4/Abb. A-5, S. 174/175). Dennoch waren die Werte am Tunnelor (Stecker 1) weiterhin durchschnittlich am niedrigsten.

Die Vorzugsströmung am Boden und die Strömungsverteilung im Haufwerk kann es erfordern, dass ein Verschließen der Belüftungslöcher über den als Randgängigkeitszone wirkenden Bereich hinausgehen muss. Die Bedingungen im Reaktorquerschnitt können dann mit denen von Rottereaktoren neuerer Bauart verglichen werden, welche nur einen mittig zwischen den Wänden in den Boden eingelassenen Belüftungskanal besitzen. Die genaue Dimensionierung der verschlossenen Flächen muss an die konkreten Bedingungen eines Rottegutes durch experimentelle Untersuchungen angepasst werden. Werden weiterhin signifikant niedrigere CO_2 -Konzentrationen an der Wand als im Haufwerkskern gemessen, muss eine Erweiterung um die in der Abb. 8-9 (rechts) dargestellte Variante erfolgen:

- Einbau von Sperren am Boden in den Strömungsweg der Randgängigkeitszone 2

Durch den Einbau seitenwandparalleler, dreieckiger Sperren wird eine Durchströmung der Zone 2 bis zu den Reaktorwänden verhindert. Eine Realisierung ist nur bei Schubbodensystemen möglich. Beim Radladerbetrieb wird die Reaktorleerung behindert. Die Integration einer Sperre quer zu den Seitenwänden würde eine Vorzugsströmung in Richtung der Haufwerksenden verhindern. Eine Realisierung scheidet aus, weil die Sperre die Befahrbarkeit des Reaktors und die Funktion der Schubböden unmöglich macht.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Maßnahmen zur Begegnung der Randgängigkeit positiv auswirken. Zustände in Form einer Gradientenfreiheit konnten erwartungsgemäß nicht beobachtet werden, weil sich eine chargenbedingte Heterogenität durch die Maßnahmen nicht verhindern lässt. Stochastische Vorzugsströmungen treten weiterhin auf. Die Abb. 8-11 stellt hierfür ein Beispiel dar²⁰. Die Optimierung muss deshalb gemeinsam mit den Maßnahmen zum Abbau der Heterogenität umgesetzt werden.

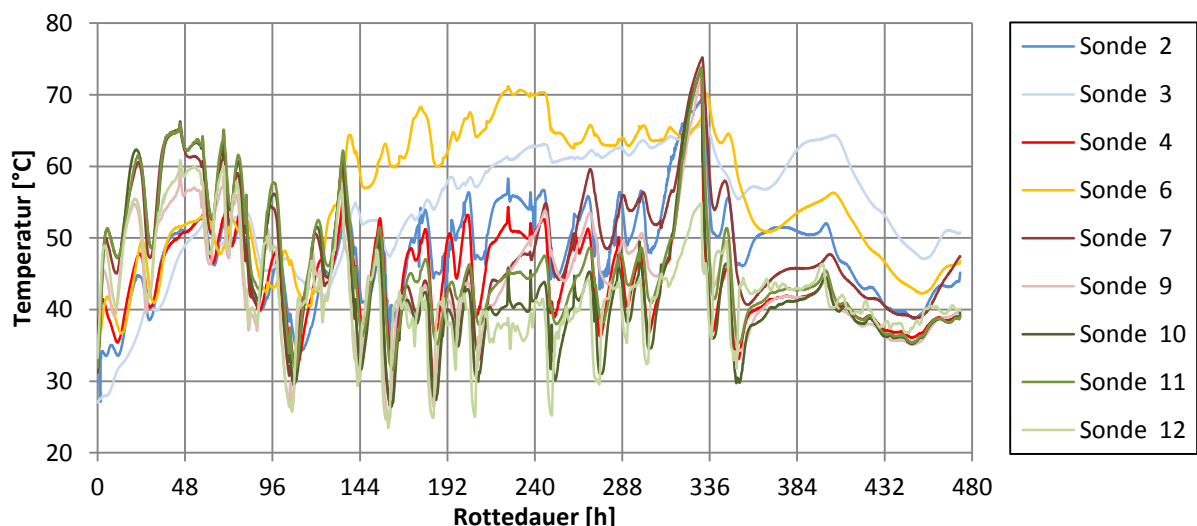


Abb. 8-11: Betriebsverhalten mit modifiziertem Belüftungsboden (GA 9)

Um nicht nur die Wirkungen einer Randgängigkeit an den Wänden und am Boden, sondern auch deren Ursachen zu beheben, sind weitreichende Umbauten bei der Art der Reaktorbeschickung notwendig, die in Kapitel 8.5.2 (S. 150 f.) diskutiert werden.

²⁰ Der starke Anstieg der Temperaturen ab etwa Rottedauer 300 h ist vermutlich durch eine an den Betriebsdaten nicht sichtbare Störung am Luftsystem verursacht, was die Belüftung einschränkt.

Die Ursachen der Randgängigkeit in den Böschungen lassen sich beheben, indem der Rotteraktor an den Enden komplett gefüllt wird. Bei Schubbodensystemen ist dies an der Rückwand (Ventilatorseite) nicht möglich, weil die Reaktorleerung zu einem Materialabriss führen und das Rottegut dieser Region nicht ausgetragen werden kann. Die Böschung auf der Torseite kann durch Einbau eines Schotts am Tunneltor verhindert werden. Weil das Schott aus strömungstechnischer Sicht nicht niedriger als die Schütthöhe sein darf, ist eine Realisierung bei einer Beschickung mit Steigband ausgeschlossen. Das Eintragsband müsste an der Decke als Horizontalband in den Reaktor einfahren (vgl. Variante 2 in Abb. 6-14, S. 80). Bei den verbreitet eingesetzten langen Rottetunneln ist diese Beschickungsvariante nicht möglich. Bei manchen MBA-Anlagen waren Schotts vorgesehen, wurden aber aufgrund fehlender Praktikabilität nicht eingesetzt²¹, so dass die Modifizierung am Belüftungsboden als einzige Maßnahme verbleibt.

8.4.4 Anpassung der Schütthöhe

Die Diskussionen zu den Einflüssen der Durchströmbarkeit, des Wärmehaushaltes und der Heterogenität lassen eine Auseinandersetzung mit einer Anpassung der Schütthöhe notwendig erscheinen. Unabhängig von den Merkmalen des Rotteraktors zeigt eine Verringerung der Haufwerkshöhe eine positive Wirkung auf folgende prozessrelevante Aspekte:

- Absolute biochemisch freigesetzte Wärme
- Durchströmwiderstand des Haufwerks
- Statischer Druck im Haufwerk
- Anzahl an Chargen im Haufwerk

Alle Aspekte reduzieren sich. Die absolute Reduzierung der Wärmefreisetzung infolge der verringerten Materialmenge verbessert die Beeinflussbarkeit der Wärmebilanz hin zu verstärkter Wärmeabfuhr. Eine relative Reduzierung ist nur durch einen verminderten Anteil nativer Organik im Stoffsystem möglich. Aufgrund des reduzierten Durchströmwiderstandes erhöht sich die Belüftungsintensität und verbessert sich die Wärmeabfuhr. Infolge der abweichenden stofflichen Zusammensetzung wird sich der Durchströmwiderstand im Kern stärker als an den Wänden verringern, so dass sich die Unterschiede in der Durchströmbarkeit der Wand- und Kernbereiche verringern. Die verminderte statische Belastung vermindert die Setzung, so dass die zeitliche Erhöhung des Durchströmwiderstandes und die Presswasserfreisetzung geringer ausfallen. Die reduzierte Anzahl an Chargen im Haufwerk führt bei einer segmentweisen Reaktorbeschickung zu einer breiteren Verteilung verschiedener Materialeigenschaften über der Reaktorlänge und damit zu einer weniger stark ausgeprägten Heterogenität.

An der MBA-Anlage A wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen die Schütthöhe um etwa 20 bis 30 cm auf 2,0 bis 2,1 m reduziert wurde. Dies entspricht einer Verringerung des Schüttungsvolumens um 9 bis 13 %. Ein positiver Effekt konnte bei zwei Versuchen nach-

²¹ Die Schotts mussten mit dem gleichen Mechanismus bewegt werden wie die Tunneltore.

gewiesen werden (TM 12, TM 14). Beim dritten Versuch (TM 13) wies das Stoffsystem eine sehr große Heterogenität auf, die mögliche positive Effekte überlagerte. Die Abb. 8-12 zeigt exemplarisch eine Messreihe und folgende Ergebnisse:

- Haufwerkstemperatur liegt nahe am Sollwert
- Reaktionsfähigkeit auf Regelungseingriffe gegeben

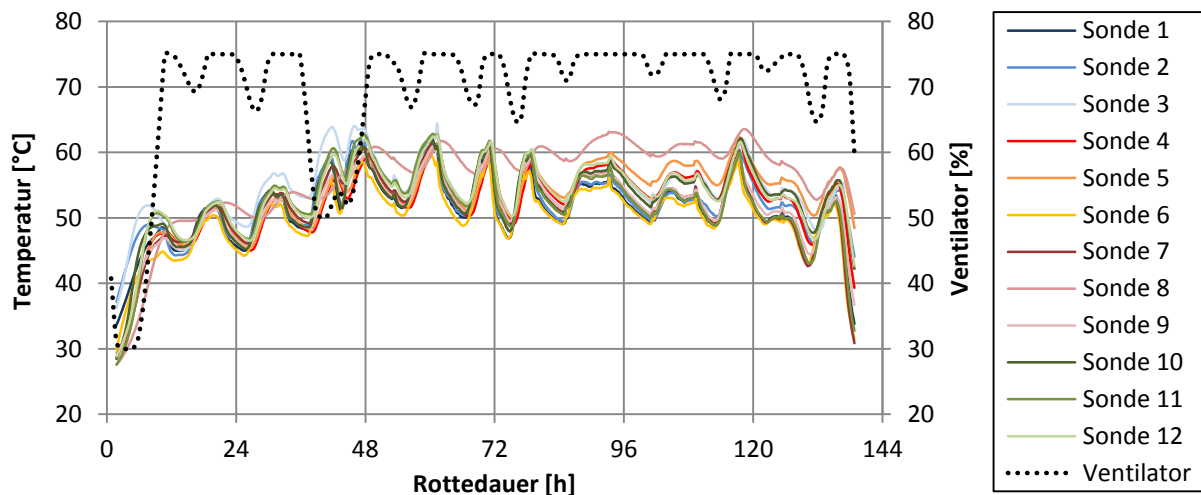


Abb. 8-12: Betriebsverhalten bei verringerter Schütthöhe (TM 12, 1.)

Aufgrund der absoluten Reduzierung der Wärmefreisetzung und der verbesserten Bedingungen zur Wärmeabfuhr kann die Temperatur am Zielwert gehalten werden. Veränderungen der Ventilatorleistung wirken sich als notwendiger Regelungseingriff direkt auf das Betriebsverhalten aus. Sie zeigen sich bei der örtlichen Temperatur vergleichsweise kräftig in Form einer ausgeprägten Amplitude. Dies ist ein Zeichen für eine gute Durchströmbarkeit.

Anpassungen bei der Schütthöhe verhindern die Heterogenität im Haufwerk sowie Vorzugsströmungen und die unvermeidbare Ausbildung und Verstärkung von Gradienten nicht. In der Abb. 8-12 ist die Gradientenbildung über der Rottedauer gut zu erkennen. Zudem ist für den Einzelfall großexperimentell zu untersuchen, ob die resultierende Verringerung des Anlagendurchsatzes durch verbesserte Prozessergebnisse und damit eine kürzere Rottedauer ausgeglichen werden kann.

8.4.5 Außerbetriebnahme der Umluftleitung

Beim Luftmanagement wurden als prozessrelevante Probleme undefinierbare Bedingungen zur Belüftung und die Konditionierung der Zuluft ermittelt. Ursache sind der Anschluss mehrerer Rotterektoren an Sammelleitungen und der Einsatz von Umluftleitungen ohne Kondensator. Weil das Fehlen eines Kondensators zugleich der wesentliche Grund für Probleme bei der Kühlfähigkeit der Luft darstellt, ist bei Anlagen mit diesen Merkmalen eine Außerbetriebnahme der Umluftleitung durch Absperrung oder Demontage erforderlich.

Durch die Außerbetriebnahme erfolgt ein reiner Frischluftbetrieb am Reaktor, der weiterhin auf der Nutzung der Sammelleitung beruht. Auf den Frischluftbedarf bzw. auf die Abluftmenge hat diese Betriebsweise keine direkten Auswirkungen (vgl. Abb. 7-2, S. 108).

Es ergeben sich folgende Vorteile:

- Direkte Steigerung der Kühlfähigkeit der Zuluft
- Keine Falschluf und kein direkter Druckausgleich zwischen den Sammelleitungen
- Verminderte Funktionsbeeinträchtigung der Frischluftklappe durch Verschmutzung

Die direkte Steigerung der Kühlfähigkeit resultiert aus der größeren Sättigungslücke von Frischluft im Vergleich zu Um- oder Mischluft. Falschlufströmungen in die Zuluft werden verhindert, weil ein durch Druckdifferenzen verursachter Kurzschluss zwischen Abluft- und Frischluftsammelleitung ausgeschlossen ist. Die Wirkung ist eine indirekte Steigerung der Kühlfähigkeit der Zuluft. Auch eine Kurzschlussströmung in umgekehrter Richtung wird verhindert, so dass sich indirekt der Abluftvolumenstrom verringert. Temperaturunterschiede zwischen beiden Seiten der Frischluftklappe sind nicht mehr gegeben und somit Kondensation und Staubablagerungen deutlich gemindert, weshalb die Funktion der Klappe im Betrieb und bei außer Betrieb befindlichen Reaktoren weniger beeinträchtigt wird.

Die Bedingungen verbessern die Möglichkeiten zur Prozessregelung und reduzieren den Zuluftbedarf und somit die erforderliche Ventilatorleistung. Damit verbunden ist eine Verringerung der Elektroenergiekosten und des Wärmeeintrags durch den Ventilator.

Bei einem reinen Frischluftbetrieb muss überprüft werden, ob eine stabile Betriebsweise der Ventilatoren auch bei niedrigen Drehzahlen noch möglich ist. Zudem ist immer eine Anpassung der Parametrierung bei der Prozessregelung erforderlich. Die Erwärmung des Haufwerks nach Prozessstart kann durch eine geringe Belüftungsintensität unterstützt werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Gradienten ist bei Frischluftbetrieb verglichen mit einem Mischluftbetrieb nur dann größer, wenn die Belüftungsintensität nicht nach unten angepasst wird. Ist die Basis zur Anpassung die Wärmeabfuhr, treten keine Unterschiede auf.

8.4.6 Installation zusätzlicher Zentralventilatoren und Drucksensoren

Werden mehrere Rottereaktoren an Sammelleitungen der Luft angeschlossen, treten unvermeidbar gegenseitige Beeinflussungen auf. Maßnahmen zur Verbesserung müssen auf definierbare und konstante Drucksituationen in den Leitungen abzielen. Die einzige Möglichkeit stellt die Installation zusätzlicher Zentralventilatoren symmetrisch im Leitungssystem und die Integration zusätzlicher Drucksensoren in den Sammelleitungen dar. Beide Maßnahmen müssen in Kombination erfolgen, weil Informationen zur örtlichen Drucksituation die Basis für eine Steuerung der Ventilatorleistung sind. Es ergeben sich folgende Vorteile:

- Abbau gravierender Druckgradienten entlang der Sammelleitung
- Überwachung und Steuerung bestimmter Druckniveaus oder Druckdifferenzen

Es kann verhindert werden, dass sich die Drucksituationen örtlich durch die Betriebsweise einzelner Rottereaktoren und infolge der Leitungslänge oder der Position der Einbindestelle stark ändern. In der Leitung können örtlich ähnliche Druckniveaus und eine definierte Druckdifferenz zu den Reaktorinnenräumen und der jeweils anderen Sammelleitung eingestellt und gehalten werden.

Als problematisch für die Prozessführung könnte sich ein durch die Abluftreinigungsanlage vorgegebener maximaler Volumenstrom (Gesamtlast) darstellen. Zudem müssten für eine Automatisierung der Steuerung erst alle Bedingungen in einer Anlage analysiert und in einen Algorithmus überführt werden. Es wäre zu untersuchen, ob die verschiedenen Betriebszustände dies in der Realität möglich machen.

8.4.7 Anpassung der Prozessregelung

Der Einfluss des Rottegutes hat bei jedem Rotteaktor die klar dominierende Rolle im Betriebsverhalten. Eingriffe im Rahmen der Regelung wirken nur unterstützend. Je weiter sich ein Rottegut vom Idealzustand entfernt, desto geringer sind die Eingriffsmöglichkeiten, weil sich das Regelungsschema an einem idealen Verhalten orientiert. Es ist eine Prozessregelung erforderlich, die über rein schematisch auf der Rottedauer basierenden Abläufen hinausgeht und den aktuellen Betriebszustand berücksichtigt.

Erst wenn Kenntnisse über das wahre Betriebsverhalten vorliegen und grundlegende Probleme der Reaktoren beseitigt sind, können Anpassungen bei der Parametrierung der Regler und der Sollwerte vorgenommen werden. Mögliche Auslöser für Anpassungen sind beispielsweise der Einsatz eines Stoffsystems mit anderen Eigenschaften oder eine veränderte Höhenposition der Stecherthermometer. Wird wiederholt ein dauerhaftes Überschreiten der Temperatur festgestellt, ist als erstes die Homogenität der Durchströmung im Haufwerk zu untersuchen, bevor die Parametrierung der Ventilatorumdrehzahl nach oben angepasst wird. Treten wiederholt sehr große Amplituden von mindestens 10 K bei der Temperatur auf, sind Probleme bei der Parametrierung wahrscheinlich. Zur Lösung muss die Differenz zwischen oberer und unterer Grenze der Solltemperatur (Schalthysterese) verringert werden, bei deren Erreichen die Belüftung angepasst wird.

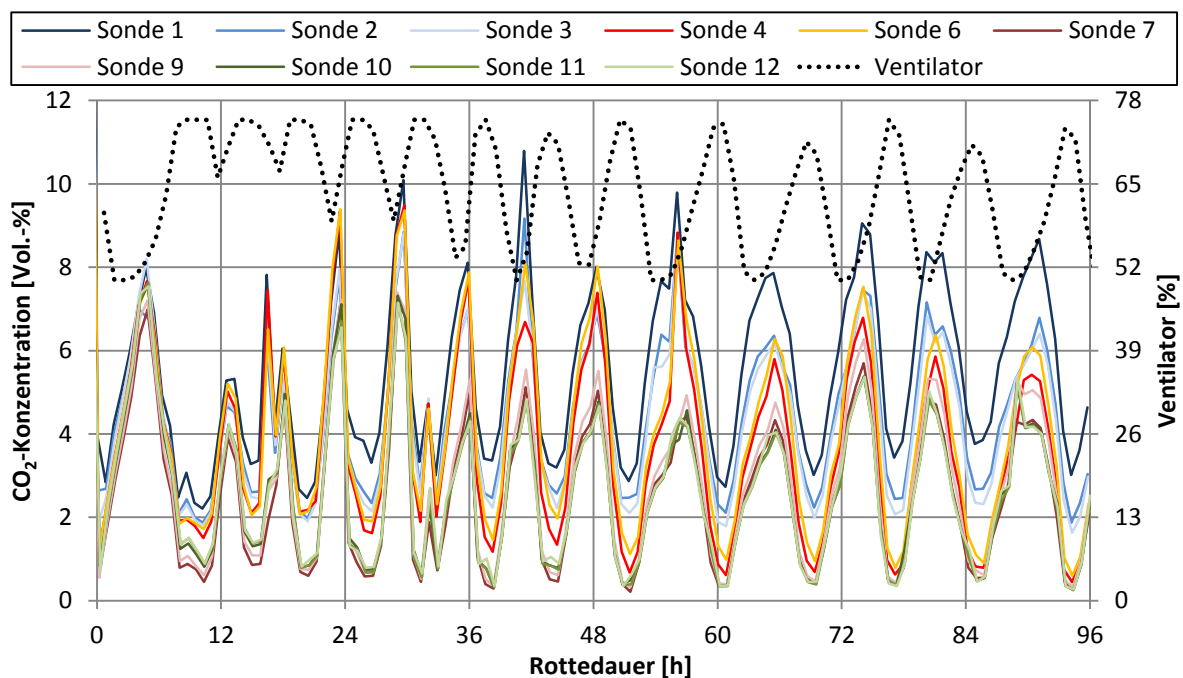


Abb. 8-13: Einfluss einer dynamischen Prozessführung auf die Heterogenität (GA 7)

Eine durch die Regelung bewusst herbeigeführte dynamische Prozessführung mit kleiner Amplitude kann dagegen theoretisch positive Auswirkungen haben. Die ständig wechselnden Druckgradienten im Haufwerk können zu Veränderungen der örtlichen Durchströmung führen und somit die Ausweitung stochastisch auftretender Vorzugsströmungswege im Haufwerk örtlich angleichen. Zur Bewertung zeigt die Abb. 8-13 exemplarisch die örtliche CO_2 -Konzentration im Ausschnitt einer Messreihe. Demnach verringern sich die Konzentrationsunterschiede zwischen den Messstellen nicht und es tritt keine Verschiebung des Größenniveaus untereinander auf. Positive Effekte einer dynamischen Prozessführung können bei den Untersuchungen demnach nicht nachgewiesen werden.

Mit der Durchströmung des Haufwerks ist zwangsläufig eine Gradientenbildung oder eine Ausweitung bestehender Gradienten im Haufwerk verbunden. Ein rechtzeitiges Erkennen verhindert negative Auswirkungen auf die Prozessergebnisse und muss als Signal für eine Materialumsetzung angesehen werden. Andere Maßnahmen sind beim statischen Rotteraktor nicht möglich. Die Prozessregelung muss die Rottedauer danach bestimmen, wann Gradienten festgestellt werden, weil es ansonsten zu einer Verschlechterung der Situation kommt. Mögliche Kennzeichen für die Existenz von Gradienten wurden in 8.2 (S. 125 ff.) diskutiert.

8.5 Ertüchtigung mit größeren Umbauten

8.5.1 Begegnung der Heterogenität im Reaktor

Die Heterogenität des Ausgangsmaterials und eine ungenügende Homogenisierung vor der Rotte können zu einer segmentweisen Einlagerung von Chargen verschiedener Eigenschaften in den Rotteraktor führen. Maßnahmen zum effektiven Abbau der Heterogenität (siehe 8.4.1, S. 133 ff.) stellen nicht immer eine hinreichende Lösung dar. Gründe sind:

- Große Materialmenge
- Starke Unterschiede zwischen den Chargen eines Anliefergebietes
- Geringer Platz im Anlieferungsbereich zur Speicherung und Mischung

In diesen Fällen können Umbauten am Rotteraktor notwendig werden. Entsprechende Maßnahmen sind insbesondere bei Anlagen relevant, bei denen die Reaktorbeschickung per Radlader oder Schleuderband erfolgt.

Die segmentweise Einlagerung stellt sich als Parallelschaltung von Durchströmwiderständen über der Reaktorlänge dar. Die verbreitet eingesetzten einfach aufgebauten Rotteraktoren mit nur einem Belüftungsraum und mit Belüftungsöffnungen lassen eine Reaktion hierauf nicht zu. Erforderlich ist eine Segmentierung des Belüftungsraumes. Die Abb. 8-14 zeigt schematisch dargestellt das Prinzip einer solchen Variante. Der Belüftungsraum wird durch Einziehen von Wänden in separat regelbare Segmente gegliedert. Zu den Segmenten führen jeweils Leitungen für die Zuluft, die außerhalb des Reaktors zusammenlaufen. In jeder Leitung sind Stelleinrichtungen und Druckaufnehmer installiert, um eine Regulierung des Volumenstroms zu ermöglichen.

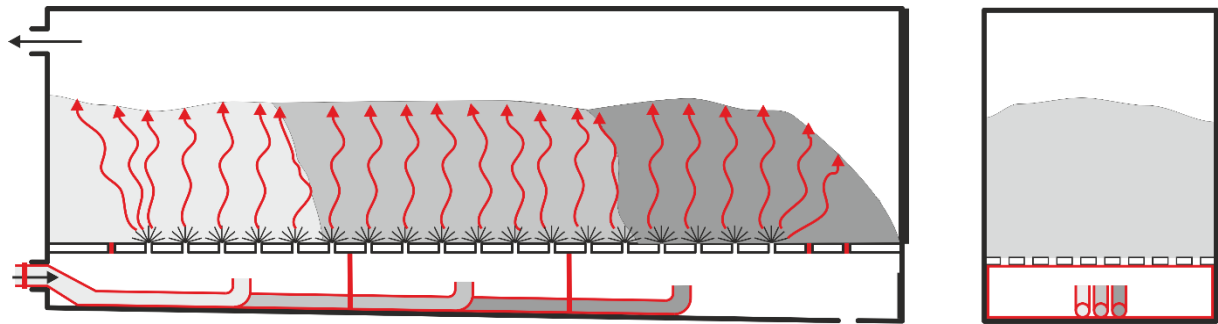


Abb. 8-14: Rottetunnel mit segmentiertem Belüftungsraum, Variante 1 (schematisch)

Eine Segmentierung lässt entsprechend der Anzahl der Segmente Reaktionen auf Situationen über der Reaktorlänge zu. Diese sind:

- Unterschiede im Durchströmwiderstand
- Unterschiede in der biologischen Aktivität
- Kombination beider Störungen

Aus der ersten Situation resultieren unterschiedliche und ggf. nicht notwendige Belüftungsintensitäten, auf welche bedarfsgerecht durch Anpassung der Anströmdrücke unter dem Haufwerk reagiert werden kann. Aus der zweiten Situation resultiert eine unterschiedliche Wärmefreisetzung, weshalb zur bedarfsgerechten Anpassung der Anströmdrücke und damit Belüftungsintensitäten mindestens auch die Haufwerkstemperatur in den Segmenten einbezogen werden muss. Bessere Aussagen ermöglicht ergänzend die örtliche Gaszusammensetzung. Die Kombination beider Störungen ist wahrscheinlich und spiegelt sich ebenfalls in der Temperatur und der Gaszusammensetzung wider, so dass eine Reaktion auch auf diese Situation möglich ist.

Die Reaktionen sind umso spezifischer, je kleiner die Segmente sind. Dies erhöht jedoch den bautechnischen und apparativen Aufwand. Beim Dombelüftungsverfahren mit der verfahrensintegrierten Segmentierung in Form der Dombereiche konnten bei der Restabfallbehandlung mit 100 m³ großen Segmenten gute Erfahrungen gemacht werden [Paar, 2000]. Bei 30 m langen und 5 m breiten Rottetunneln resultieren aus dieser Größenordnung maximal vier Segmente. Unter diesen Bedingungen würde der batchweise Betrieb vorhandener Homogenisierungstrommeln vor der Rotte aufgrund deren Größe eine Rückvermischung des Materials je Segment ermöglichen. Damit wären grundlegende Voraussetzungen für ein verbessertes Betriebsverhalten erfüllt.

Nachteil der Segmentierung nach Abb. 8-14 ist die erschwerte, aber notwendige Zugänglichkeit der Segmente (z.B. zur Reinigung), weil die Höhe des Belüftungsraumes nur etwa 1 m beträgt. Eine Realisierung dieser am einfachsten erscheinenden Variante ist deshalb problematisch. Das Problem wird gelöst, wenn die Bereiche des Belüftungsbodens in das Leitungssystem eingebunden sind. Das Grundprinzip einer solchen Variante ist in der Abb. 8-15 schematisch dargestellt. Für die konkrete konstruktive Umsetzung existieren verschiedene Möglichkeiten, welche stets die im Folgenden beschriebenen Aufgaben erfüllen müssen. Schwierig für den Umbau werden sich bei allen Möglichkeiten die vorliegenden Platzverhältnisse darstellen.

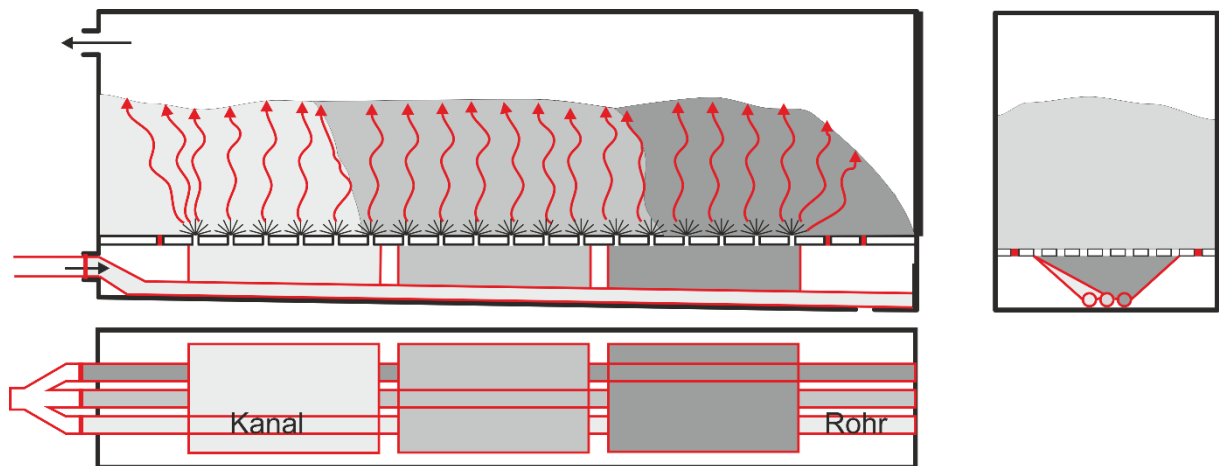


Abb. 8-15: Rottetunnel mit segmentiertem Belüftungsraum, Variante 2 (schematisch): Längsschnitt und Querschnitt (oben) und Draufsicht (unten)

Im Belüftungsraum werden über der Reaktorlänge Rohre mit leichter Neigung für jedes Segment verlegt und jeweils eine Stelleinrichtung außerhalb des Reaktors installiert. Die Rohre enden absperrrbar auf der Torseite. In der Variante öffnet sich in jedem Segment ein Rohr nach oben und wird zum Belüftungskanal. Die Kanten werden durch Wände mit dem Belüftungsboden verbunden, so dass je Segment ein geschlossener Belüftungsraum mit der Form eines auf dem Kopf stehenden Trapezkörpers entsteht. Zur Begegnung der Randgängigkeit im Reaktor werden die Belüftungslöcher in den Randbereichen des Haufwerks (Wände, Böschungen) dauerhaft verschlossen und nicht mit in die Segmentierung einbezogen, so dass sich die Größe des Trapezkörpers bzw. die Anströmfläche entsprechend verringert. Mögliches Sickerwasser gelangt in die Rohre und fließt Richtung Torseite, an welcher es durch Öffnung einer Armatur abgelassen werden kann. Verunreinigungen werden durch eine Spülung ebenfalls auf diesem Weg entfernt.

8.5.2 Umbau der Art der Reaktorbeschickung

Die dargestellten Maßnahmen zur Begegnung einer im Reaktor vorliegenden Heterogenität (vgl. 8.5.1, S. 148 ff.) und Randgängigkeit (vgl. 8.4.3, S. 140 ff.) zielen nur auf die Wirkungen ab. Die Ursachen können nicht behoben werden. Verbesserungen in dieser Richtung ergeben sich durch einen Umbau der Art der Reaktorbeschickung, wobei das Grundprinzip durch Nutzung der Reaktortore bestehen bleibt. Entsprechende Maßnahmen sind bei Anlagen relevant, bei denen die Reaktorbeschickung per Radlader oder Schleuderband erfolgt.

Die Auswirkungen einer Heterogenität im Haufwerk sind für das Betriebsverhalten weniger relevant, wenn die Chargen im Reaktor als Reihenschaltung vorliegen. Hierzu müssen die Chargen in Lagen übereinander (schichtenweise) in den Reaktor eingetragen werden. Die Abb. 8-16 zeigt das Ergebnis. Die Vorteile einer schichtenweisen Beschickung sind:

- Ausgleich abweichender spezifischer Durchströmwiderstände über der Höhe
- Gleichmäßige Ausbildung von Gradienten
- Verringerung der Randgängigkeit an den Wänden und am Boden

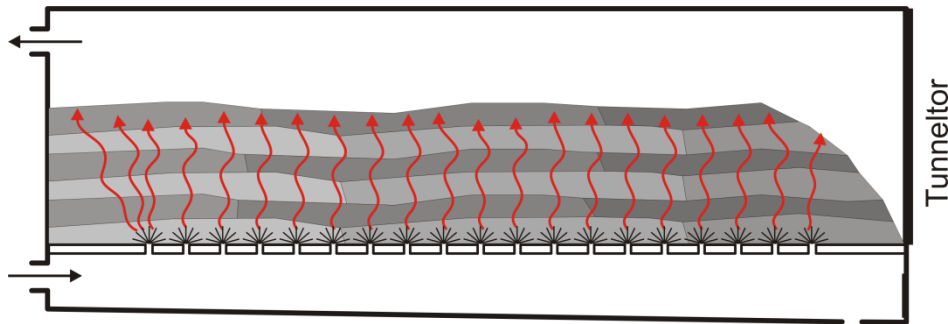


Abb. 8-16: Rottetunnel nach einer schichtenweisen Beschickung

Eine Einlagerung der Chargen in Schichten führt zu einer zufälligen Verteilung der spezifischen Durchströmwiderstände über der Höhe. Der aus der Schichtdicke resultierende Durchströmwiderstand je Charge ist somit ebenfalls zufällig über der Höhe verteilt. Die Reihenschaltung der Widerstände führt zu einem Durchströmwiderstand über dem Haufwerk, der an jeder Stelle der Anströmfläche annähernd gleich ist. Dies ist die Voraussetzung für eine homogene Durchströmung des Haufwerks. In diesem Fall bilden sich belüftungsbedingte Gradienten über der Reaktorlänge und über der Reaktorbreite gleichmäßig aus und können durch eine Materialumsetzung wieder abgebaut werden.

Bei einer schichtenweisen Beschickung findet die Ausbildung relevanter Schüttkegel nicht statt, so dass eine Separierung von Komponenten als Basis bestimmender Randgängigkeitszonen an den Wänden und am Boden vermieden wird. Die Art der Beschickung ermöglicht die Integration eines Schotts auf der Torseite des Reaktors, um Böschungen und damit Randgängigkeitszonen an den Haufwerksenden zu verhindern. Außerdem erfordert eine schichtenweise Beschickung keine gesonderten Reaktionen auf den Rotteverlust. Die Volumenabnahme spiegelt sich in den weiteren Rotteschritten in einer geringeren Schütthöhe wider.

Bei der Lösung handelt es sich um eine vermeintlich optimale. Allerdings verdeutlicht die Abbildung, dass eine Schicht in der Realität nicht nur aus Material einheitlicher Eigenschaften besteht. Dies wäre nur bei kurzen oder schmalen Reaktoren sowie einer stets gleichen Materialmenge der Fall. Andernfalls lagern sich verschiedene Chargen neben und übereinander ein. Es kann deshalb nicht immer davon ausgegangen werden, dass die stochastische Verteilung verschiedener spezifischer Durchströmwiderstände überall zu einheitlichen Durchströmwiderständen führt. Reicht der Volumenumfang einer Charge für eine komplette Lage nicht aus, ist die Erfüllung positiver Effekte unsicher. Zudem können sich aufgrund der schichtenweisen Anordnung horizontale Strömungen in den Schichten Richtung Reaktorwand und Haufwerksenden ausbilden. Mögliche Böschungen führen dann zu Kurzschlussströmungen und damit zu einer ungleichen Flusssdichte der Luft im Strömungsfeld über der Haufwerkshöhe.

Eine Umrüstung bestehender Reaktorsysteme ist technisch möglich. Die Beschickung müsste als Kombination von Verfahrenband und Horizontalband erfolgen (vgl. Abb. 6-14, S. 80). Der Umbau ist aufwändig und bei langen Rottetunneln sogar ausgeschlossen.

8.5.3 Trennung der Rottereaktoren von den Sammelleitungen

Die Trennung der Rottereaktoren von den Sammelleitungen ist als Maßnahmen bei nahezu allen Anlagen relevant, weil die Reaktoren üblicherweise an solche Leitungen angeschlossen sind. Bei der Diskussion ist folgende Unterscheidung notwendig:

- Trennung der Reaktoren von der Frischluftsammelleitung
- Trennung der Reaktoren von der Abluftsammelleitung

Trennung der Reaktoren von der Frischluftsammelleitung

Mit der Trennung von der Frischluftsammelleitung liegt die Quelle der Frischluft unmittelbar an den Rottereaktoren. Die Ansaugung der Luft erfolgt durch die einzelnen Ventilatoren direkt im Ventilatorgang und damit in einem großen Raum (vgl. Abb. 5-7, S. 53). Aufgrund der Größe liegt die Strömungsgeschwindigkeit in dem Raum nahe Null und somit der Luftdruck relativ konstant. Es ergeben sich folgende Vorteile:

- Steigerung der Kühlfähigkeit der Zuluft
- Verbesserte Transparenz in der Belüftungsintensität

Die Kühlfähigkeit erhöht sich direkt, weil die Luft der Umgebung und nicht mehr anderen Anlagenteilen entstammt. Die Frischluftmenge wird sich im Vergleich zum Zustand vor dem Umbau entsprechend verringern. Die Authentizität der festgelegten Belüftungsintensität wird gesteigert, weil der konstante Druck auf der Saugseite des Ventilators hierfür eine notwendige Bedingung ist. Beeinflussungen auf der Druckseite (Haufwerk/Abluft) bestehen weiterhin. Der Druck auf der Frischluftseite wird sich auf etwa Normaldruck verringern. Weil hierdurch die Differenz zum negativen Druck auf der Abluftseite kleiner wird, werden jedoch Falschlufströmungen begünstigt, wenn sich der Druck auf der Abluftseite erhöht. Eine Lösung hierfür ist die Außerbetriebnahme der Umluftleitung.

Der durch den Luftverbrauch im Ventilatorgang erforderliche Druckausgleich muss durch Öffnungen an die Umgebung erfolgen. Die Abb. 8-17 zeigt für den umgebauten Ventilatorgang, dass im Sommer kühlere Umgebungsluft über Wandöffnungen einströmt und direkt eingesetzt wird. Im Winter strömt Luft über Deckenöffnungen ein. Durch Einbindung des Raumes über den Rottereaktoren wird die Abwärme der Reaktordecken genutzt und hierdurch Minima der Außentemperatur abgemildert.

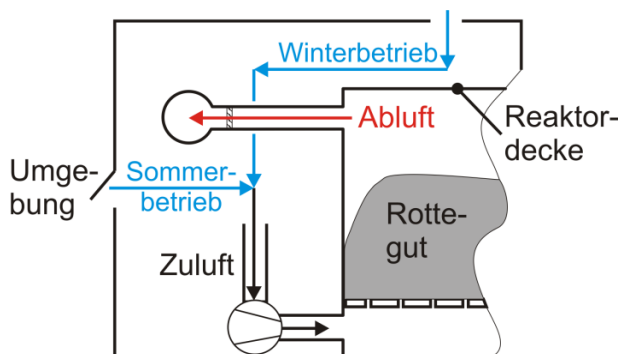


Abb. 8-17: Trennung der Rottereaktoren von der Frischluftsammelleitung

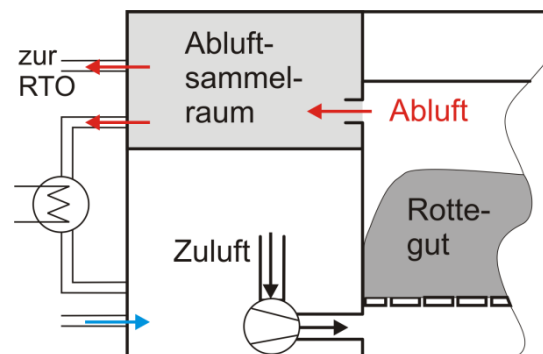


Abb. 8-18: Trennung der Rottereaktoren von der Abluftsammelleitung

Die Quellen der bisher in der Sammelleitung bereitgestellten Frischluft (z.B. Anlieferungsbe-
reich der Anlage) müssten in eine separate Behandlung eingebunden werden. Damit sind
ggf. genehmigungsrechtliche Probleme verbunden. Zugleich wird der Ventilatorgang zu einer
Art Betriebsraum, womit entsprechende Sicherheitsvorkehrungen erforderlich sind.

Trennung der Reaktoren von der Abluftsammelleitung

Bei einer Trennung von der Abluftsammelleitung muss eine Erfassung aller Abluftströme für
die anschließende Reinigung weiterhin gewährleistet sein. Hierzu werden alle Reaktoren an
einen neuen Abluftsammelraum angeschlossen. Es ergibt sich folgender Vorteil:

- Verbesserte Transparenz in der Belüftungsintensität

Die Authentizität der festgelegten Belüftungsintensität wird gesteigert, weil die Druckverhält-
nisse auf der Druckseite des Ventilators weniger starken Schwankungen unterliegen. Vo-
raussetzung ist ein ausreichend groß dimensionierter Raum. Hierzu müsste eine Abtrennung
im Ventilatorgang realisiert werden, wie es die Abb. 8-18 zeigt.

Die Wände des Abluftsammelraums könnten als Kondensationsfläche und damit als teilwei-
se Senke für die im Rotteprozess anfallende Wärme dienen. Zusätzlich würde die Installation
eines zentralen Kondensators die Kühlfähigkeit von Abluft herstellen und den Einsatz als
Zuluft ermöglichen. Damit ist eine Trennung von der Frischluftsammelleitung zusätzlich sinn-
voll. Nur ein Teilstrom der Abluft wird der Reinigung zugeführt.

Im Vergleich zum Umbau auf der Frischluftseite ist der Aufwand bei der Abluft wesentlich
größer. Es bedarf einer genauen Kalkulation, ob die prozesseseitigen Vorteile (insbesondere
mit einem zentralen Kondensator) einen entsprechenden Ausgleich ermöglichen.

8.6 Anforderungen an die Gestaltung neuer Anlagen

Die Ausarbeitungen zu den Ursachen und Wirkungen prozessrelevanter Einflussfaktoren
beim Betrieb sowie zur Ertüchtigung bestehender Anlagen ließen erste Rückschlüsse auf die
Anforderungen an neue MBA-Anlagen zu. Solche Anlagen entsprechen mit einer durchdach-
ten Konzeption den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft, weil mit ihnen die unvermeidbar
anfallenden Restabfallfraktionen stofflich getrennt und flexibel auf veränderte abfallwirtschaft-
liche Rahmenbedingungen reagiert werden kann. Die im Restabfall enthaltenen verwertba-
ren Fraktionen müssen in hoher Qualität (geringe Verschmutzung, lagerfähig) gewonnen und
nicht verwertbare Komponenten als ablagerungsfähige Restfraktion sowie Schadstoff ausge-
schleust werden. Die Stoffströme sind in der Abb. 8-19 dargestellt.

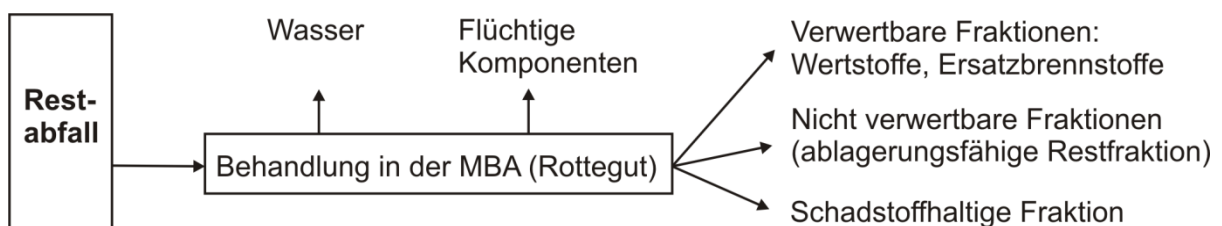


Abb. 8-19: Stoffströme bei der Restabfallbehandlung

Restabfall enthält zum Großteil Feststoffe und gebundenes Wasser, aber auch leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe. Die verwertbaren Fraktionen der Feststoffe können durch eine Stoffstromtrennung zugänglich gemacht werden. Für eine hohe Qualität dieser Fraktionen muss vor der Stoffstromtrennung eine Trocknung des Stoffsystems erfolgen. Die für die Qualitätsminderung verantwortlichen leicht abbaubaren nativ-organischen Komponenten müssen abgebaut werden und die notwendige Wärmeenergie liefern. Der erste Rotteschritt stellt damit eine biologische Trocknung dar. Anschließend ist eine Siebung notwendig, um die bei der weiteren Stoffstromtrennung störende, nicht verwertbare Feinfraktion abzutrennen. Diese muss bis zum Erreichen der Ablagerungskriterien in einem zweiten Rotteschritt behandelt werden. Die Abb. 8-20 zeigt die beschriebene Grundkonzeption neuer MBA-Anlagen.



Abb. 8-20: Grundkonzeption neuer MBA-Anlagen

Für einen ökonomischen Betrieb muss der Luftvolumenstrom minimal sein. Es ist ein Reaktorbetrieb mit Umluft und integriertem, zentralem Kondensator notwendig, um die Kühlfähigkeit der Luft wiederherzustellen. Lediglich ein Teilstrom der Abluft wird der Reinigung zugeführt und entspricht der zur Sauerstoffversorgung notwendigen Frischluftmenge. Die Drucksituationen auf der Saug- und Druckseite der Reaktorventilatoren müssen konstant und definierbar sein. Es sind wirksame Absperrorgane in Form drehbarer Stellklappen installiert, um außer Betrieb befindliche Reaktoren vom Luftsystem abzutrennen.

Als Reaktorkonzepte im ersten Rotteschritt können der statische Rotteraktor oder der Drehrohrreaktor als geeignete Variante eines dynamischen Rotterektors (vgl. 2.4, S. 14 f.) genutzt werden. Die Eignung wird im Folgenden diskutiert.

Statischer Rotteraktor

Das Betriebsverhalten statischer Rotterektoren wurde umfassend in der Arbeit dargestellt. Voraussetzung für eine regelgerechte Funktion eines Festbetts ist dessen Homogenität. Dies setzt eine umfangreiche Anlagentechnik voraus:

- Tagesbunker im Anlieferungsbereich zur Mischung
- Vorzerkleinerer
- Homogenisierungstrommel in der Größe eines Reaktors und batchweise betrieben
- Statische Reaktoren im ersten und zweiten Rotteschritt schichtenweise beschickt

In der Diskussion zur Ertüchtigung wurde deutlich, dass der statische Rotteraktor als konstruktive Merkmale einen Betrieb als Vollstromanlage, eine Beschickung mit Verfahrband und einen Umluftbetrieb mit Kondensator aufweisen muss. Nachteile bleiben aufgrund der konzeptionsbedingten, unvermeidbaren Merkmale eines Festbetts dennoch bestehen. Es kommt zur Ausbildung sekundärer Gradienten über der Haufwerkshöhe. Aufgrund der ruhenden Schüttung trocknet sich Feingut auf den Oberflächen der Komponenten fest, wodurch deren Qualität gemindert wird. Zugleich tritt ein Kompaktieren des Stoffsystems ein, was den Effekt der anschließenden Stoffstromtrennung weiter verschlechtert. Eine zielge-

richtete Belüftung zur gleichmäßigen Wärmeabfuhr und Trocknung über der Höhe ist nicht möglich, weshalb haufwerksintegral immer ein Betrieb mit Luftüberschuss vorliegen muss.

Derartige Kompromisse darf eine nachhaltige Lösung nicht aufweisen. Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass ein statischer Rotteraktor für die Restabfallbehandlung insbesondere im ersten Rotteschritt am schlechtesten geeignet ist.

Drehrohrreaktor

Über die Vorteile einer bewegten durchströmten Schüttung aus Rottegut liegen Kenntnisse in [Bartha, 2008] vor. Das Reaktorkonzept stellt prozesstechnisch ein liegendes Drehrohr dar, welches etwa zur Hälfte mit Material gefüllt wird. Die Belüftung des Materials erfolgt durch eine Düsenleiste unter dem Haufwerk. Falls erforderlich kann eine Bewässerung im Betrieb erfolgen. Zum Wirksamwerden der Vorteile und zur Reduzierung der mechanischen Beanspruchung von Stoffsystem und Apparatechnik ist eine intermittierende Drehbewegung ausreichend. Die Abb. 8-21 zeigt die Konzeption einer MBA-Anlage mit Drehrohrreaktor und die wesentliche Anlagentechnik:

- Flachbunker im Anlieferungsbereich zur Mischung
- Vorzerkleinerer
- Drehrohrreaktor im ersten und statischer Rotteraktor im zweiten Rotteschritt

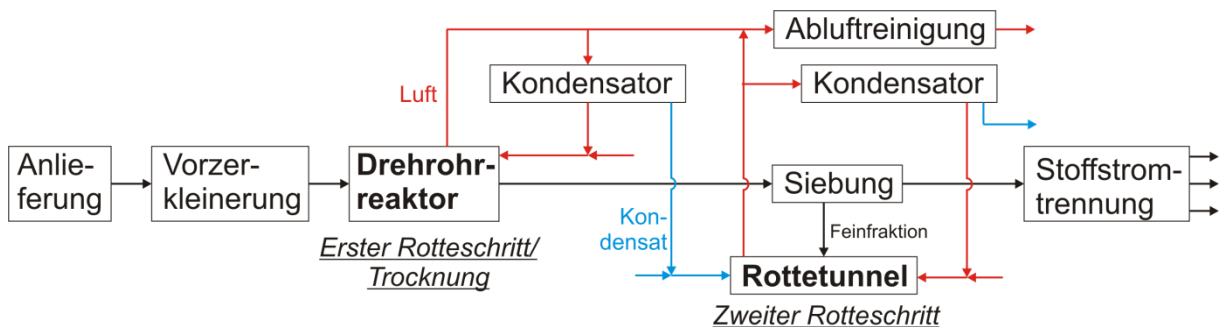


Abb. 8-21: Konzeption einer MBA-Anlage mit Drehrohrreaktor

Der Restabfall wird in einem Flachbunker getrennt nach Anliefergebieten zwischengelagert und diese wechselweise in den Vorzerkleinerer aufgegeben, um eine signifikante Heterogenität abzubauen. Die Homogenisierung ist kein extra Schritt. Sie ist in den ersten Rotteschritt integriert, weil noch vorhandene Eigenschaftsgradienten des Stoffsystems abgebaut werden. Ursache ist die Drehbewegung des Reaktors. Aufgrund der nur zeitweiligen Bewegung der Schüttung treten zwar innerhalb der Ruhezeiten eine belüftungsbedingte Ausweitung primärer Gradienten und eine Ausbildung sekundärer Gradienten auf. Der anschließende, wiederholende Abbau der Gradienten ist jedoch der ausschlaggebende Vorteil zum Festbett. Außerdem werden durch den Eintrag von mechanischer Energie und durch autogene Zerkleinerung neue Oberflächen geschaffen und damit der Stoffaustausch maximiert.

Die Materialbewegung führt zu einer Säuberung der Oberflächen der enthaltenen festen Fraktionen. Der wiederholende Abbau von Gradienten und die hohe Materialverfügbarkeit erlauben eine Belüftung mit der prozessseitig minimalen Frischluftmenge. Aufgrund der Bedingungen sind Messwerte in der Abluft repräsentativ für die Prozesse im Haufwerk, so dass die Steuerung anhand dieser Messwerte erfolgen kann. Die Ablufttemperatur charakterisiert

die Haufwerkstemperatur und erlaubt einen Betrieb mit maximalen Abbaugraden und Wasserausträgen. Der CO_2 -Gehalt in der Abluft ermöglicht mit einer Volumenstrommessung eine stoffliche Prozessbilanzierung [Bartha, 2008].

Die Verweilzeit des Rottegutes im Drehrohr muss aufgrund der optimalen Prozessbedingungen signifikant niedriger als im statischen Rotteraktor sein. Damit kann das größere Volumen des Stoffsystems (aufgrund der Vollstromanlage) ausgeglichen werden. Im zweiten Rotteschritt ist das Materialvolumen minimal, weil durch die gute Trennbarkeit die technisch maximal mögliche Ausschleusung der festen Zielfractionen erfolgt. Die Rottefähigkeit im zweiten Rotteschritt ist gegeben, weil die prozesstechnisch anspruchsvollen leicht abbaubaren Komponenten im ersten Schritt abgebaut wurden und die übrige native Organik noch enthalten ist. Zur Aktivierung ist eine Bewässerung vor dem Eintrag in den Reaktor notwendig. Hierzu ist das Kondensat aus dem ersten Rotteschritt zu nutzen. Für eine effiziente Abluftnutzung ist auch im zweiten Rotteschritt ein Kondensator erforderlich.

Die kürzere Behandlungsdauer erlaubt eine Integration von Drehrohrreaktoren an bestehenden Anlagen. Sie ersetzen einige statische Rotteraktoren, während die Verbliebenen unter weitgehendem Erhalt vorhandener Anlagenkomponenten für den zweiten Rotteschritt genutzt werden.

Die Darstellungen wurden bewusst auf die prinzipiellen Anforderungen und Vorteile neuer Anlagen beschränkt. Eine umfassende Auseinandersetzung macht die Beantwortung detaillierter Fragestellungen notwendig, wozu weitergehende theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten erforderlich sind. Im Wesentlichen betrifft dies folgende Aspekte:

- Stoffstrommanagement am Drehrohrreaktor
- Rottedauer und erzielbare Abbaugrade
- Luftmanagement und Prozessintegration der bei der Trocknung anfallenden Flüssigkeit

Relevant sind technische Lösungen zur Beschickung und Leerung und ein geeignetes, aus den Prozessergebnissen abzuleitendes Reaktorvolumen. Problematisch beim Luftmanagement könnten die flüchtigen Kohlenwasserstoffe im anfallenden Kondensat sein, insbesondere aus der Startphase des Rotteprozesses. Es ist zu untersuchen, ob diese Substanzen entweder durch die Bewässerung (d.h. in gelöster Form) auf das Haufwerk gegeben werden oder als Bestandteil der feuchten Umluft bei mehrmaligem Durchlauf (d.h. Kreislaufführung) das Haufwerk durchströmen. In beiden Fällen müssten die Substanzen biologisch abgebaut werden, um im Folgenden eine Ausschleusung der Flüssigkeit zu ermöglichen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Statische Rottereaktoren sind geschlossene Bauwerke zur Realisierung von Rotteprozessen in einem Festbett. Einsatzfelder sind die biologische Behandlung und biologische Trocknung von Abfällen mit biogenen Anteilen (Entsorgungsaspekt) und die Bioabfallkompostierung (Verwertungsaspekt). Aufgrund der großen Verbreitung und bestehender Probleme im Betrieb ist eine Auseinandersetzung mit diesem technologischen Konzept notwendig.

In der Vergangenheit wurden insbesondere biochemische Untersuchungen zum Stoffsystem durchgeführt. Nur ungenügend erfolgte eine integrale prozesstechnische Durchdringung des Reaktors und seiner Peripherie. In der Arbeit wurden die Bedingungen und Vorgänge in der Makroebene durch Anwendung verfahrenstechnischer Methoden im notwendigen Kontext von Stoffsystem und technischem System untersucht. Die Aspekte konnten qualitativ nachgewiesen und analysiert, aber teilweise nur eingeschränkt quantitativ bewertet werden. Aufgrund der Heterogenität des Stoffsystems, fehlender Möglichkeiten zur Erstellung einer Stoff- und Wärmebilanz sowie zahlreicher Wechselwirkungen im Betrieb wurde als einzige aussichtsreiche Methodik zur Untersuchung die Analyse einer typischen in Betrieb befindlichen Anlage festgelegt. Sie erfolgte am Beispiel einer MBA-Anlage mit Rottetunneln.

Es wurden verallgemeinerungsfähige Vorgehensweisen und experimentelle Lösungen entwickelt, um den Rottereaktor und seine Peripherie als System zu analysieren. Die Bedingungen und Vorgänge wurden aufgedeckt und folgende Ziele erreicht:

- Identifikation prozessrelevanter Einflussfaktoren und Analyse ihrer Wirkungen
- Identifikation prozesstechnischer Probleme statischer Rottereaktoren
- Ableitung von Maßnahmen für einen verbesserten Betrieb

Die Bewertung des Rotteprozesses erfolgte anhand der Reaktion des Systems selbst, d.h. durch das Betriebsverhalten, welches sich in Messgrößen widerspiegelt. Die experimentellen Lösungen waren nicht nur Hilfsmittel für die Untersuchungen, sondern zugleich ein wesentliches Ergebnis. Sie eignen sich zur Charakterisierung großer Rottegruthaufwerke und von Bedingungen in Großanlagen. Zur Charakterisierung wurden genutzt:

- Durchströmbarkeit und Setzungsverhalten von Rottegrutchargen im Realmaßstab mit einer Durchströmsäule
- Örtliche Temperatur und Gaszusammensetzung im Haufwerk mit Messsonden
- Differenzdruck im Prozessluftsystem mit Differenzdrucksensoren

Die Durchströmbarkeit diene der Beschreibung und Bewertung der Bedingungen für die biochemischen Prozesse mithilfe physikalischer Größen. Sie bestimmt wesentlich den Wär-

me- und Wasserhaushalt sowie die Sauerstoffversorgung im Rotteguthaufwerk. Untersucht wurde der Zustand einzelner Chargen. Weil mehrere Chargen das Haufwerk bilden, lässt sich dessen Zustand qualitativ beurteilen. Die gemeinsame Analyse von Temperatur und Gaszusammensetzung als Messraster im Haufwerk ermöglichte Aussagen zur örtlichen Durchströmungssituation, zum Wärmehaushalt und zu Rückwirkungen in der Prozessführung. Der Differenzdruck (zur Umgebung) im Luftsystem war eine Hilfsgröße, um Strömungsrichtungen und die Bedingungen zur Belüftung beurteilen zu können.

Als für den praktischen Einsatz an Anlagen geeignete Parameter wurden der Wassergehalt und die Schüttdichte festgelegt. Die Untersuchungen zeigten, dass sich die Schüttdichte mit steigendem Wassergehalt erhöht. Weil das Wasser überwiegend an leicht abbaubarer biogener Substanz gebunden ist, ist ein Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem Anteil dieser Organik im Stoffsystem wahrscheinlich. Die Gegenüberstellung von Schüttdichte (bzw. Wassergehalt) und Haufwerkssetzung lieferte keine verwertbaren Ergebnisse. Zwischen Schüttdichte (bzw. Wassergehalt) und Durchströmbarkeit bestand nur ein unscharfer Zusammenhang. Die Parameter sind deshalb nur begrenzt zur Bewertung der prozessrelevanten Haufwerksstruktur und des haufwerkstechnischen Verhaltens anwendbar.

Die wesentlichen Einflussfaktoren für das Betriebsverhalten lassen sich dem Zustand und Verhalten des Stoffsystems (Durchströmbarkeit einzelner Chargen, Durchströmung des Haufwerks im Reaktor, Wassergehalt) sowie der Wirkung der Prozessführung (Luftmanagement, Prozessüberwachung, Prozessregelung) zuordnen. Beim Stoffsystem wurden als problematisch für das Betriebsverhalten identifiziert:

- Heterogenität von Rottegut und der fehlende Abbau der Heterogenität vor der Rotte
- Segmentweise Einlagerung in den Reaktor aufgrund der Art der Reaktorbeschickung
- Randgängigkeit und Böschungen im Haufwerk
- Mangelhafte Rottefähigkeit von Rottegutchargen

Die Heterogenität von Rottegut ist signifikant ausgeprägt und zeigt sich in der Durchströmbarkeit, im Wassergehalt und in der Schüttdichte der Chargen. Ursachen der Heterogenität sind ebensolche Unterschiede im Ausgangsmaterial und der fehlende Ausgleich der Stoffeigenschaften in den der Rotte vorgeschalteten Aufbereitungsschritten. Die Reaktorbeschickung kann nicht zu einem großräumigen Abbau der Heterogenität beitragen, so dass es zu einer entsprechend heterogenen Struktur im Haufwerk kommt. Weil die Beschickung üblicherweise segmentweise erfolgt, stellt sich die Heterogenität im Haufwerk als Parallelschaltung von Chargen und deren Eigenschaften über der Reaktorlänge dar. Eine Materialumsetzung in den nächsten Rotteschritt findet entgegengesetzt der Füllung statt und trägt deshalb nicht zu einem Abbau der Heterogenität bei. Der Einsatz von Schleuderbändern bei der Reaktorbeschickung führt aufgrund der breiten Partikelgrößenverteilung zu einer Separierung bestimmter Komponenten des Stoffsystems. Es bilden sich Randgängigkeitszonen an den Wänden und am Boden des Reaktors aus, die sich in ihren Eigenschaften von denen der übrigen Bereiche unterscheiden. Die Auswirkungen der Zonen treten vergleichbar bei im Haufwerk vorhandenen Böschungen auf. Die Rottefähigkeit einzelner Chargen ist aufgrund schlechter Durchströmbarkeit und hoher Wassergehalte häufig nicht gegeben.

Die Bedingungen rund um das Stoffsystem bestimmen die Durchströmungssituation. Es treten Vorzugsströmungen im Haufwerk auf, die wie folgt charakterisiert werden können:

- Stochastisch infolge der Heterogenität der Rottegutchargen
- Systematisch als Randgängigkeit infolge der verschiedenen Formen der Randeffekte

Vorzugsströmungen haben Auswirkungen im Nahbereich der Strömungen und auf das gesamte Haufwerk. Stark durchströmte Bereiche trocknen aus und nativ-organische Komponenten schrumpfen hierdurch. Die Durchströmbarkeit verbessert sich und es kommt zu einer starken Wärmeabfuhr. In schwach durchströmten Bereichen steigt der Wassergehalt, weil die durch biologische Prozesse freigesetzte Flüssigkeit nur ungenügend abgeführt wird. Die Durchströmbarkeit verschlechtert sich und die Wärmeabfuhr ist gering. Die Effekte führen zu einer Verstärkung primärer Gradienten in der Durchströmbarkeit und damit zur Verstärkung oder Ausbildung von Gradienten in weiteren physikalischen Eigenschaften sowie der biologischen Aktivität. Zugleich führt eine Durchströmung stets zur Ausbildung sekundärer Gradienten im Haufwerk.

Bei der Prozessführung wurden als problematisch für das Betriebsverhalten identifiziert:

- Undefinierbare Bedingungen zur Belüftung durch den Aufbau des Prozessluftsystems
- Luftkonditionierung

Die Aufgaben der Belüftung werden nur ungenügend erfüllt. An das Prozessluftsystem sind mehrere Reaktoren angeschlossen, was zu einer Kopplung der Reaktoren führt. Die verbreitet vorhandene Umluftleitung stellt eine Verbindung zwischen Frischluft- und Abluftseite her und verstärkt die Wirkungen signifikant. Das Verhalten von Reaktoren wird untereinander beeinflusst und vorgegebene Betriebsregime können nicht eingehalten werden. Es liegen undefinierbare Drucksituationen am Reaktor vor, die zu einer zufälligen Beeinflussung der Belüftungsintensität und zu Falschluf in der Zuluft führen. Eine Umluftleitung ohne Kondensator bewirkt, dass die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft bei Umluftbetrieb und damit die notwendige Wärmeabfuhr nicht gegeben sind.

Weil das Stoffsystem der bestimmende Teil des Reaktors ist, lassen sich Probleme im Betrieb nur teilweise durch rein technische Eingriffe der Reaktorkomponenten lösen. Die Prozessregelung und die Prozessüberwachung können das vom Stoffsystem vorgegebene Betriebsverhalten nicht grundlegend beeinflussen.

Abschließend wurden Maßnahmen zur Ertüchtigung bestehender statischer Rottereaktoren diskutiert und diese nach ihrer Machbarkeit (wenige oder größere Umbauten) unterteilt. Die Maßnahmen wurden den konstruktiven Merkmalen bestimmter Anlagentypen zugeordnet und übergreifend relevante Maßnahmen definiert. Als wesentliche Maßnahmenpakete, mit einer Priorität in der aufgeführten Reihenfolge, wurden festgelegt:

1. Rottegutaufbereitung
2. Durchströmung des Haufwerkes
3. Luftmanagement

Maßnahmen zur Ertüchtigung müssen vor der Rotte ansetzen. Die Heterogenität des Ausgangsmaterials muss abgebaut werden, indem der Restabfall verschiedener Anliefergebiete

und damit sammelgebietsspezifischer Zusammensetzung getrennt gespeichert wird und eine wechselweise Beschickung des Vorzerkleinerers erfolgt. Die Rottfähigkeit ist bei Teilstromanlagen durch Erhöhung des Siebschnitts oder durch den Einsatz von Zuschlagstoffen zu verbessern. Die Durchströmung des Haufwerks muss homogen erfolgen. Es ist einer Randgängigkeit an Wänden und Böschungen zu begegnen, indem Belüftungslöcher in diesen Regionen verschlossen werden. Eine Segmentierung des Belüftungsraumes ermöglicht spezifische Reaktionen bei der Belüftungsintensität, wenn eine segmentweise Heterogenität im Haufwerk vorliegt. Die Reduzierung der Schütthöhe verringert die Wärmefreisetzung, den Durchströmwiderstand und die Anzahl an Chargen zur Verbesserung der Prozessführung. Das Luftmanagement muss eine Entkopplung von Reaktoren und definierbare Druckniveaus auf der Frischluft- und Abluftseite der Reaktoren gewährleisten. Dies kann durch Außerbetriebnahme der Umluftleitung, Trennung von den Luftsammelleitungen oder die Installation zusätzlicher Zentralventilatoren in den Sammelleitungen erfolgen. Eine Umluftleitung ohne Kondensator ist außer Betrieb zu nehmen, um die Kühlfähigkeit der Zuluft zu verbessern.

Aus den Problemen bestehender statischer Rottreaktoren ließen sich Anforderungen an neue Anlagen ableiten und speziell auf MBA-Anlagen beziehen. Wesentliche konzeptionsbedingte Probleme sind unvermeidbar und nicht zu lösen, insbesondere die Gradientenbildung, ein notwendiger Luftüberschuss und ein inhomogenes Behandlungsergebnis. Weil ein statischer Rottreaktor zu viele dieser Kompromisse erfordert, wurde als zielführende und optimale Variante für den ersten Rotteschritt der Drehrohrreaktor bestimmt.

Die Untersuchungen haben das Verständnis von den Bedingungen und Vorgängen im statischen Rottreaktor deutlich gesteigert. Konzeptionsbedingte und konstruktive Merkmale mit resultierenden Problemen wurden herausgearbeitet. Im Vordergrund standen die integrale prozesstechnische Durchdringung und weniger die Detailbetrachtung bestimmter Aspekte. Für solche Betrachtungen wird keine Notwendigkeit gesehen, weil diese nur für den Einzelfall (Anlagenstandort) gelten würden. Vorschläge für das weitere Vorgehen sind:

- Umsetzung und langfristige Untersuchung von Maßnahmen zur Ertüchtigung, um quantifizierbare Aussagen zu Verbesserungen zu ermöglichen
- Konzipierung von Untersuchungen zum Drehrohrreaktor, um technologische und wirtschaftliche Fragenstellungen zu beantworten

Der erste Vorschlag überführt die Erkenntnisse zur direkten Anwendung und erfordert standortspezifisch auch eine prozesstechnische und ökonomische Beurteilung von Maßnahmen. Die Resultate können nicht verallgemeinert werden, würden aber eine Einordnung der Aufwendungen und erzielter Verbesserungen (Prozessergebnis, Betriebskosten) ermöglichen. Der zweite Vorschlag begründet sich zwangsläufig aus den in der Arbeit dargestellten Unzulänglichkeiten statischer Rottreaktoren. Es ist eine Strategie aus theoretischen und experimentellen Untersuchungen notwendig, um die erkennbaren Vorteile von Drehrohrreaktoren auf großtechnische Anlagen übertragen zu können.

Literaturverzeichnis

AbfRRL, 2008. *Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle (2008/98/EG)*.

Agnew, J.M., Leonard, J.J., Feddes, J. & Feng, Y., 2003. *A modified air pycnometer for compost air volume and density determination*. Canadian Biosystems Engineering, Vol. 45.

Bari, Q.H.K.A., 2000. *Kinetic analysis of forced aeration composting- II. Application of multilayer analysis for the prediction of biological degradation*. Waste Management & Research; Vol. 18, No. 4, 313-319.

Barrington, S., Choiniere, D., Trigui, M. & Knight, W., 2002. *Compost Airflow Resistance*. Biosystems Engineering 81 (4), 433–441.

Bartha, B., 2008. *Entwicklung einer Steuerungsstrategie für die biologische Abfallbehandlung im dynamischen Reaktor*. Dissertation TU Dresden.

Bertoldi, d.M., Rutili, A., Citterio, B. & Civilini, M., 1988. *Composting management- A new process control through O₂ feedback*. Waste Management & Research 6, 239-259.

Bidlingmaier, W., 2000. *Biologische Abfallverwertung*. Stuttgart: Ulmer.

Bidlingmaier, W. & Denecke, M., 1998. *Grundlagen der Kompostierung*. Berlin: Müll-Handbuch, Kennz. 5305, Lfg. 11/98, Erich-Schmidt-Verlag.

BioAbfV, 2012. *Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden*.

BMLFUW, 2005b. *Stand der Technik der Kompostierung - Richtlinie des BMLFUW*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich.

Bröker, E., Nieweler, A. & Tegtmeyer, E., 2000. *Status der niedersächsischen Anlagen*. Potsdam: Brandenburgische Umwelt Berichte 6.

Brummack, J., 2015. *Entsorgungstechnik, Lehrunterlagen*. TU Dresden.

Brummack, J. & Kießling, A., 2009. *Optimierungsmaßnahmen MBA-Anlage A - Auswertung Daten Tunnelsteuerung*. unveröffentlicht. TU Dresden.

Dach, J., 2000. *Anforderungen an die Deponierung von MBA-Abfällen*. Potsdam: Brandenburgische Umwelt Berichte 6.

Das, K. & Keener, H.M., 1996. *Process Control based on Dynamic Properties in Composting: Moisture and Compaction considerations*. The Science of Composting, 116-125. Springer.

- Das, K. & Keener, H.M., 1997. *Moisture effect on compaction and permeability in composts*. Journal of Environmental Engineering Vol. 123, Issue 3.
- DepV, 2009. *Verordnung über Deponien und Langzeitleger*.
- Destatis, 2014a. *Abfallbilanz 2012*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Destatis, 2014b. *Abfallentsorgung 2012*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Doedens, H., 2001. Abgas aus Mechanisch-Biologischer Abfallbehandlung – Einleitung. Hamburger Berichte 17: Abluft 2001, Verlag Abfall aktuell.
- Doedens, H., 2002. *Emissionen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung*. Berlin: Müll-Handbuch, Kennz. 5612, Lfg. 9/02, Erich Schmidt Verlag.
- Doedens, H., von Felde, D. & Cuhls, C., 2000. *Wissenschaftliche Begleitung der drei großtechnischen Demonstrationsanlagen zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen in Niedersachsen. Endbericht*. Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik Universität Hannover; Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Entsorgung.
- DWA, 2013. *Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung (MBA): Merkblatt DWA; Entwurf*. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Eisfeld, B. & Schnitzlein, K., 2001. *The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds*. Chemical Engineering Science 56, 4321-4329.
- Ekinci, K., Keener, H.M. & Akbolat, D., 2004. *Effect of thermocouple location on the optimum composting rate*. Biosystems Engineering 89 (3), 345–353.
- Ekinci, K., Keener, H.M. & Akbolat, D., 2006. *Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation*. Bioresource Technology 97 (2006) 922–932.
- Entenmann, W. & Wendt, P., 2005. *Einbauversuche mit AbfAbIV-konformen MBA-Output*. 9. Münsteraner Abfallwirtschaftstage.
- Fertig, J., 1981. *Untersuchungen von Wechselwirkungen zwischen Belüftung, Wärmebildung, Sauerstoffverbrauch, Kohlendioxidbildung und Abbau der organischen Substanz bei der Kompostierung von Siedlungsabfällen*. Dissertation Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Flinsbach, W., 1981. *Untersuchungen über Luftporenvolumen und Luftwiderstand bei der Müllkompostierung*. Diplomarbeit Universität Stuttgart.
- Franke, M. & Degener, P., 2003. *Wasserhaushalt in der offenen Nachrotte von Restabfällen*. Müll und Abfall 8.
- Fricke, K. & Müller, W., 1999. *Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkungen auf die Deponie*. BMBF Verbundvorhaben "Mechanisch-biologische Vorbehandlung von zu deponierenden Abfällen", Teilvorhaben 2/1.
- Fricke, K., Niesar, M. & Turk, T., 2002. *Restabfallmengen und -qualitäten für die mechanisch-biologischen Restabfallbehandlungsverfahren*. Berlin: Müll-Handbuch, Kennz. 5616, Lfg. 11/02, Erich-Schmidt-Verlag.

- Fricke, K. & Turk, T., 2000. *Stand und Perspektiven der biologischen Abfallverwertung und -behandlung in Deutschland*. TA-Datenbank-Nachrichten, Nr. 1, 9. Jg.
- Fritsche, W., 1990. *Mikrobiologie*. Jena: Gustav Fischer.
- Ginkel, J.T.v., 1996. *Physical and biochemical processes in composting material*. PhD Thesis Wageningen Agricultural University.
- Ginkel, J.T.v., Raats, P.A.C. & Van Haneghem, I.A., 1999. *Bulk density and porosity distributions in a compost pile*. Netherlands Journal of Agricultural Science 47, 105-121.
- Grabbert, G. & Khokhlov, M., 2000. *Theoretische und experimentelle Untersuchung lokaler Porositäten in Füllkörperschüttungen*. Neue Erkenntnisse zur Charakterisierung und Durchströmung poröser Systeme aus verfahrenstechnischer Sicht. Freiburger Forschungsberichte.
- Gray, K.R., Sherman, K. & A.J., B., 1971. *A review of composting Part I*. Process Biochemistry 6.
- Haug, R.T., Tortorici, L.D. & Raksit, S.K., 1977. *Sludge processing and disposal - A state of the art review*.
- Heyer, K.-U., 2003. *Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge*. Stuttgart: Hamburger Berichte 21, Abfall aktuell.
- Hupe, K., Heyer, K.-U. & Stegmann, R., 2000. *Biologische Bioabfallverwertung: Kompostierung kontra Vergärung*. Hamburg: IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft.
- Illa, J., Prenafeta-Boldú, F.X., Bonmatí, A. & Flotats, X., 2012. *Empirical characterisation and mathematical modelling of settlement in composting batch reactors*. Bioresource Technology 104 (2012), 451–458.
- IVU, o.J. Fotosammlung. Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik.
- Jäckel, U. & Kämpfer, P., 2003. *Mikrobiologie der Kompostierung*. Berlin: Müll-Handbuch, Kennz. 5210, Lfg. 09/03, Erich-Schmidt-Verlag.
- Jahn, M., 2011. *Messstellenumschaltssystem für Gasmessungen mit feuchtegesättigten Gasen*. Projektarbeit TU Dresden.
- Janikowski, U. & Wiegel, G., 1993. *Schwierigkeiten bei der Festlegung einer Bestimmungsmethode für die biologisch abbaubare Substanz im Deponiegut*.
- Jeris, J. & Regan, R., 1973. *Controlling environmental parameters for optimum composting*. Compost Science 14, S. 8-15.
- Kaiser, J. & Soyezy, K., 2000. *Zum Wasser und Wärmehaushalt des Intensivrotteprozesses der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung*. Potsdam: Brandenburgische Umweltberichte 8.
- Kämpfer, P., 2001. *Biologische Behandlung organischer Abfälle*. Springer.
- Kehres, B., 2009. *Die Bundesgütegemeinschaft wird 20*. Humuswirtschaft & Kompost aktuell: 1-2.

- Kern, M. & Siepenkothen, H.-J., 2012. *Orientierende Restmüllanalyse Abfallzweckverband Südniedersachsen*. Witzenhausen-Institut.
- Kern, M. & Siepenkothen, J., 2014. *Bioabfallerfassung 2.0 - Neue Chancen und Herausforderungen*. Kassel: 26. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum.
- Ketelsen, 2006. *Einfluss von Abfallzusammensetzung, Verfahrenstechnik und Anlagenbetrieb auf die Einhaltung der Zuordnungskriterien von MBA-Abfällen*. MBA Workshop 26.09.2006 Hannover.
- Ketelsen, K., 2006. *Mechanisch-biologische Abfallbehandlung in Deutschland: Konzepte, Planungen, Anlagenbeispiele, Betriebserfahrungen*. Biologische Abfallbehandlung, Budapest.
- Ketelsen, K., 2008. *Optimierung von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen*. Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz.
- Kirschbaum, E., 1969. *Destillier- und Rektifiziertchnik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kraft, E., 2001. *Charakterisierung von Bioabfällen - Voraussetzung für die Optimierung des Kompostierungsprozesses*. Berlin: Rhombus Verlag, Manuskripte zur Abfallwirtschaft, Nr. 5.
- Kranert, M., 1989. *Freisetzung und Nutzung von thermischer Energie bei der Schlammkompostierung*. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft 33.
- Kranert, M., 2010. *Einführung in die Abfallwirtschaft. 4. Edition*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Krogmann, U., 1994. *Kompostierung - Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung*. Bonn: Economica Verlag.
- KrWG, 2012. *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen*.
- Kühle-Weidemeier, M., 2004. *Bedarf, Konstruktionsgrundlagen und Betrieb von Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Restabfälle in Deutschland*. Dissertation Universität Hannover.
- Kühle-Weidemeier, M., 2007. *Anlagen zur mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung - Schlussbericht, Teil 1 Hauptbericht*. Langenhagen.
- Kumar, M., Ou, Y.-L. & Lin, J.-G., 2010. *Co-composting of green waste and food waste at low C-N ratio*. Waste Management 30, 602–609.
- Kutzner, H.J. & Jäger, T., 1994. *Kompostierung aus mikrobiologischer Sicht - ein Essay*. In R. Böhm, ed. *Fünftes Hohenheimer Seminar "Nachweis und Bewertung von Keimemissionen bei der Entsorgung von kommunalen Abfällen sowie spezielle Hygieneprobleme der Bioabfallkompostierung*. Gießen: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V.
- Lechner, P., 2010. *Abbauleistung während der mechanisch biologischen Abfallbehandlung*. BOKU Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft.

- LfU Bayern, 2008. *Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern)*. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Liang, C., Das, K.C. & McClendon, R.W., 2003. *The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend*. Bioresource Technology 86, 131–137.
- Lynch, N.J. & Cherry, R.S., 1996. *Design of Passively Aerated Compost Piles: Vertical Air Velocities between the Pipes*. Biotechnology Progress, Vol. 12, Issue 5, 624–629.
- MacFarlane, S.T., 1999. *Investigation of airflow through a compost-based biofilter*. Phd Thesis University of Toronto.
- McCartney, D. & Chen, H., 2001. *Using a biocell to measure effect of compressive settlement on free air space and microbial activity in windrow composting*. Compost science & utilization, Vol. 9, No. 4, 285-302.
- McGuckin, R.L. & Eiteman, M.A.D.K., 1999. *Pressure Drop through Raw Food Waste Compost containing Synthetic Bulking Agents*. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 72, Issue 4, 375–384.
- Miller, F.C., 1989. *Matric water potential as an ecological determinant in compost, a substrate dense system*. Microbial Ecology 18, 59-71.
- Miller, F.C., 1991. Biodegradation of solid wastes by composting. In A.M. Martin, ed. *Biological Degradation of Wastes*. pp.1-30.
- Mu, L., 2011. *Wasserhaushalt in der Intensivrotte der MBA*. Diplomarbeit TU Dresden.
- Mu, R. & Leonard, L., 1999. *Measurement of air flow through MSW-sewage sludge compost*. Canadian Agricultural Engineering 41(2), 93-97.
- Müller, W., Heckenkamp, G., Niesar, M. & Fricke, K., 2000. *Wertstoffgewinnung in der mechanischen Aufbereitung*. Potsdam: Brandenburgische Umwelt Berichte 6.
- Neubauer, C. & Öhlinger, A., 2006. *Ist-Stand der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung (MBA) in Österreich*. Wien: Umweltbundesamt.
- Neumann, T., 2007. *Mehrphasige Durchströmung heterogener kompressibler poröser Medien*. Dissertation Universität Dortmund.
- Niese, G., 1959. *Mikrobiologische Untersuchungen zur Frage der Selbsterhitzung organischer Stoffe*. Archiv für Mikrobiologie 34, 285-318.
- ÖWAV, 2009. *Anforderungen an den Betrieb von Kompostierungsanlagen*. Regeln des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Regelblatt 518.
- Paar, S., 2000. *Das Dombelüftungsverfahren - ein Verfahren zur Belüftung offener Rottenmieten unter Nutzung des thermischen Auftriebs*. Dissertation TU Dresden.
- Reinhardt, T., 1999. *Untersuchungen zur Dynamik biologischer Prozesse in drei-Phasen-Systemen am Beispiel der Restabfallrotte unter besonderer Berücksichtigung anaerober Teilprozesse*. Dissertation TU Darmstadt.

- Reitz, D., 1998. *Recherche zum Stand der Prozeßsteuerung in Kompostierungsanlagen*. Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen.
- Rheinbaben, W.v., 1976. *Auswirkungen einer kurzen anaeroben Zwischenphase auf die Kompostierung von Siedlungsabfällen*. Dissertation Justus Liebig-Universität Gießen.
- Richard, T.L., Hamelers, H.V.M.B., Veeken, A. & Silva, T., 2002. *Moisture Relationships in Composting Processes*. Compost Science & Utilization, Vol. 10, Issue 4.
- Richard, T.L., Veeken, A.H.M., Wilde, V.d. & Hamelers, H.V.M.B., 2004. *Air-Filled Porosity and Permeability Relationships during Solid-State Fermentation*. Biotechnology Progress 20, 1372-1381.
- Ruggieri, L., Gea, T., Artola, A. & Sánchez, A., 2009. *Air filled porosity measurements by air pycnometry in the composting process - A review and a correlation analysis*. Bioresource Technology 100, 2655–2666.
- Rynk, R., 1992. *On-Farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES-54).
- Saczinski, J., 2012. *Realisierung und Einsatz der kontinuierlichen Gasmessung in Rottereaktoren*. Diplomarbeit TU Dresden.
- Saint-Joly, C., Peyre, A., Bochu, J.L. & N'Dao, O., 1989. *Pressure losses during ventilation of manure*. Biological Wastes, Volume 30, Issue 2, 123-132.
- SASE, 2010. *Asche, Kehricht, Saubermänner - Stadtentwicklung, Stadthygiene und Städtereinigung in Deutschland bis 1945. Urbaner Umweltschutz 1*. Iserlohn.
- Schaub-Szabo, S.M. & Leonard, J.J., 1999. *Characterizing the bulk density of compost*. Compost Science & Utilization, Vol. 7, No. 4.
- Schneider, F. & Lebersorger, S., 2009. *Untersuchung der Lebensmittel im Restmüll in einer oberösterreichischen Region*. Universität für Bodenkultur Wien.
- Scholwin, F., 2005. *Durch Prozessregelung zum Rotteerfolg: ein modellbasiertes Regelungskonzept für biologische aerobe Abfallbehandlungsanlagen auf der Grundlage von Fuzzy Logic*. Berlin: Rhombos-Verlag.
- Schrewe, J. & Traue, A., 2008. *Betriebsoptimierungspotenziale (Wassergehaltsoptimierung, Organikabbau) am Beispiel der BA Ennigerloh*. ASA Abfalltage Hannover.
- Schu, R., 2006. *Zukunftsfähige MBA Konzepte*. Neuruppin: Energie aus Abfall, Band 1, TK Verlag.
- Schuchardt, F., 1987. *Zur Bedeutung des Luftporenvolumens für die Kompostierung organischer Schlämme*. Grundlagen der Landtechnik 37: 108-115.
- Schulze, D., 2009. *Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sesay, A.A., Lasaridi, K.E. & Stentiford, E.I., 1998. *Aerated static pile composting of municipal solid waste (MSW) - a comparison of positive pressure aeration with hybrid positive and negative aeration*. Waste Management & Research 16, 264-272.

- Soyez, K., 2001. *Mechanisch-biologische Abfallbehandlung: Technologien, Ablagerungsverhalten und Bewertung / Gesamtdarstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens "Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen"*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Soyez, K. et al., 2001. *Ergebnisse des BMBF-Verbundvorhabens Mechanisch-biologische Abfallbehandlung*. Berlin: Müll-Handbuch, Kennz. 5613, Lfg. 4/01, Erich-Schmidt-Verlag.
- Soyez, K., Thrän, D., Koller, M. & Hermann, T., 2000. *Ergebnisse von Forschungsvorhaben zur mechanisch-biologischen Behandlung von zu deponierenden Abfällen*. Potsdam: Brandenburgische Umwelt Berichte 6.
- UBA, 1999. *Bericht zur "Ökologischen Vertretbarkeit" der mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen einschließlich deren Ablagerung*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Umbach, M., 2011. *Konzeption und Integration von örtlichen Druckmessungen in das Prozessluftsystem einer MBA mit statischer Intensivrotte*. Diplomarbeit TU Dresden.
- VDI, 2013. *VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure. 11. Auflage*. Berlin: Springer. Kap. L1.6.
- Wanka, S., 2011. *Optimierung der Prozessführung Rottetunnel der MBA*. Diplomarbeit TU Dresden.
- Weichelt, K. & Brummack, J., 2013. *Aerobe Gärrestnachbehandlung MBA Freienhufen*. unveröffentlicht. TU Dresden.
- Weißbart, J., Lammert, B., Vetter, R. & Groschupp, C., 2001. *Stickstoffverfügbarkeit von Komposten im Ökolandbau*. ITADA Colmar: Abschlussbericht zum Projekt 1.2.1.
- Wiemer, K., 1999. *Praxisgerechter Wert: Durch Kreislaufführung kann die mechanisch-biologische Aufbereitung den Standard der Abluft-Emissionsbegrenzung nach 17. BImSchV problemlos einhalten*. Müllmagazin 4.
- Yue, B. et al., 2008. *Pile settlement and volume reduction measurement during forced-aeration static composting*. Bioresource Technology 99, 7450–7457.
- Zambra, C.E., Moraga, N.O. & Excudey, M., 2011. *Heat and mass transfer in unsaturated porous media - Moisture effects on compost piles self-heating*. International Journal of Heat and Mass Transfer 54, 2801–2810.

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abb. 2-1:	Vereinfachte Darstellung des natürlichen Stoffkreislaufes	6
Abb. 2-2:	Idealer aerober biologischer Abbau: Temperaturverlauf samt Einteilung in Phasen und pH-Wert-Verlauf über der Rottedauer, nach [Brummack, 2015]	8
Abb. 2-3:	Stofftransport beim aeroben biologischen Abbau eines Sekundärpartikels	9
Abb. 2-4:	Haufwerksfuß bei MBA-Fraktion 0 - 40 mm nach 24 h Setzung [IVU, o.J.]	9
Abb. 2-5:	Systematik der Abfallarten und grau hinterlegt der Geltungsbereich der Arbeit .	12
Abb. 2-6:	Technologische Konzepte für Rotteprozesse im Festbett und grau hinterlegt der Geltungsbereich der Arbeit, verändert nach [Brummack, 2015]	15
Abb. 2-7:	Nutzungsvarianten rein aerober biologischer Verfahren zur Restabfallbehandlung	16
Abb. 3-1:	Idealer statischer Rotterektor	18
Abb. 3-2:	Druckverlust über einem durchströmten Haufwerk (links: Prinzip, rechts: Betriebspunkt bei zwei Schüttungen mit unterschiedlicher Durchströmbarkeit) ..	20
Abb. 3-3:	Eigenschaften eines idealen und eines realen Festbetts statischer Rotterektoren	20
Abb. 3-4:	Zusammensetzung einer Restabfallfraktion mit Beispielkomponenten	20
Abb. 4-1:	Berechneter Druckverlust von konditioniertem Klärschlamm in Abhängigkeit verschiedener Tiefenpositionen in der Schüttung und Wassergehalte [Das & Keener, 1997]	25
Abb. 4-2:	Zusammensetzung von Restabfall (links) [Kern & Siepenkothen, 2012] und der enthaltenen Organikfraktion (rechts) [Kern & Siepenkothen, 2014]	28
Abb. 4-3:	Korngrößenverteilung (in Ma.-%) von Restabfall aus Haushalten und Geschäften und einzelner darin enthaltener Fraktionen [Fricke et al., 2002]	29
Abb. 4-4:	Korngrößenverteilung (in Ma.-%) von Restabfall (links) und der darin enthaltenen Fraktion Organik (rechts) jeweils vor und nach der Zerkleinerung mit verschiedenen Aggregaten [Fricke & Müller, 1999]	30
Abb. 4-5:	Schüttdichte unterschiedlicher Rotteversuche und deren Veränderung über der Rottedauer [Fricke & Müller, 1999]	34
Abb. 4-6:	Luftporenvolumen im Material aus Proben aus verschiedener Haufwerkshöhe [Flinsbach, 1981]	34
Abb. 4-7:	Enthalpie- und Wärmeströme an einem Rotterektor	36
Abb. 4-8:	Selbsterhitzung von Frischmüll bei konstanter Belüftungsstärke von 5,95 L _{Luft} /kg _{TS} ·h [Fertig, 1981]	36
Abb. 4-9:	Temperaturfeld einer Rottebox in Intervallen belüftet und in einer geschlossenen Halle platziert (oben) sowie unbelüftete offene Dreiecksmiete (unten) [Kämpfer, 2001]	38
Abb. 4-10:	Temperatur (Angaben in [°C]) in einem druckbelüfteten Containerkompostierungssystem (Querschnitt: 1,9 x 1,5 m) [Scholwin, 2005] ...	38

Abb. 4-11: Einfluss des Wassergehaltes auf die Atmungsaktivität gemessen als maximale Rottetemperatur [Bidlemaier & Denecke, 1998]	40
Abb. 4-12: Wassereintrag und Wasseraustrag in der Intensivrotte [Schrewe & Traue, 2008]	43
Abb. 4-13: Einfluss des O ₂ -Gehaltes in der Abluft auf den AT ₄ -Wert im Rottegut in Abhängigkeit der Rottedauer [Doedens, 2001]	46
Abb. 4-14: Erforderlicher Luftbedarf in Abhängigkeit des Rest-Vol.-% an O ₂ und unterschiedlicher Entnahme heizwertreicher Fraktionen [Doedens, 2002]	47
Abb. 5-1: Verfahrensschema der physikalischen Aufbereitung der Restabfalllinie	50
Abb. 5-2: Tunnelfüllhalle mit Tunnelreihen: Transportband Beschickung (Nr. 2), Eintragsmaschine (Nr. 3), Austragsmaschine (Nr. 4), Transportband Leerung (Nr. 5) [IVU, o.J.].....	50
Abb. 5-3: Eintragsmaschine im Rottetunnel: Kopfwagen mit Eintragsband (links) und Steigbandförderer mit Steuerklappe (rechts) [IVU, o.J.]	51
Abb. 5-4: Rottetunnel (Längsschnitt) der untersuchten MBA-Anlage.....	52
Abb. 5-5: Belüftungsboden eines Rottetunnels (Draufsicht), Nennmaße in [m] (links: Gesamtansicht, rechts: Detail Belüftungslöcher).....	52
Abb. 5-6: Reaktorbetrieb mit Frischluft (links), Umluft (Mitte), Mischluft (rechts).....	52
Abb. 5-7: Prozessluftsystem Intensivrotte: Ventilatorgang [IVU, o.J.]	53
Abb. 5-8: Prozessluftsystem Intensivrotte: Schema	53
Abb. 5-9: Bezeichnung der Verfahrensschritte der Rotte und des Rottegutes	54
Abb. 5-10: Durchströmsäule (oben) und benötigte Technik (unten)	58
Abb. 5-11: Druckverlust über der Leerrohrgeschwindigkeit zu zwei Zeitpunkten (DS 5).....	60
Abb. 5-12: Durchströmwiderstand über der Versuchsdauer (DS 5).....	60
Abb. 5-13: Durchströmwiderstand in Abhängigkeit der Anfangsschütthöhe (DS 13)	61
Abb. 5-14: Messsonde Unterteil (links) und Oberteil (rechts)	62
Abb. 5-15: Ausleitung der Sonden aus dem Tunnel und Temperaturdatenlogger	63
Abb. 5-16: Messwagen zur manuell durchgeführten Gasanalyse.....	63
Abb. 5-17: Messsystem Gasanalyse und Temperatur (oben: Schema und Messanordnung auf der Tunneldecke, unten: Umschaltsystem und Gasanalysator)	64
Abb. 5-18: Messstellen im Rottetunnel der MBA-Anlage (Draufsicht, nicht maßstabsgerecht).....	65
Abb. 5-19: Messanordnung Differenzdruck (links: Paneele, rechts: Steuereinheit auf der Tunneldecke angeordnet).....	66
Abb. 5-20: Messstellen Differenzdruck Rottetunnel.....	67
Abb. 6-1: Charakterisierung des Betriebsverhaltens an statischen Rottereaktoren	68
Abb. 6-2: Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten eines statischen Rottereaktors	69
Abb. 6-3: Spezifischer Durchströmwiderstand verschiedener Chargen Rottegut.....	71
Abb. 6-4: Spezifische Durchströmwiderstände zum Start und im stationären Zustand	72
Abb. 6-5: Veränderung des spezifischen Durchströmwiderstandes mit der Setzung	73
Abb. 6-6: Korrelation zwischen der Schüttdichte am Ende und Start der Versuche.....	73
Abb. 6-7: Korrelation zwischen der Schüttdichte am Ende und dem Wassergehalt.....	73
Abb. 6-8: Trocken- und Nassschüttdichte sowie Wassergehalt verschiedener Chargen ...	74
Abb. 6-9: Korrelation zwischen Setzung und Schüttdichte im stationären Zustand	75
Abb. 6-10: Korrelation zwischen spezifischem Durchströmwiderstand und Schüttdichte im stationären Zustand	75
Abb. 6-11: Wärmehaushalt eines Rottegutheufwerkes.....	76

Abb. 6-12: Rottegutabhängige Haufwerksstruktur: unzerkleinert (links), zerkleinert (Mitte) und Material nach Zerkleinerung und Stoffstromtrennung (rechts).....	77
Abb. 6-13: Bewertung von Verweilzeit und Homogenisierung des Inputmaterials in der Stufe der physikalischen Aufbereitung (links: aufgebrachter Tracer, rechts: Ergebnis) [IVU, o.J.]	78
Abb. 6-14: Verfahrensvarianten einer Reaktorbeschickung (Längs- und Draufsicht).....	80
Abb. 6-15: Schüttkegelausbildung (Draufsicht Rottetunnel)	81
Abb. 6-16: Separierung beim Abwurf von Rottegut durch die Flugbahn und nach dem Auftreffen auf das Haufwerk	81
Abb. 6-17: Heterogenität des Haufwerks am Beispiel von zwei Chargen im Rotteraktor ...	83
Abb. 6-18: Heterogenität im Reaktor durch Material abweichender Rotteschritte (GA 11) ..	85
Abb. 6-19: Heterogenität im Reaktor durch Material abweichender Eigenschaften (TM 13, 1.)	86
Abb. 6-20: Randgängigkeit im Rotteraktor (links: Querschnitt, rechts: Längsschnitt).....	88
Abb. 6-21: Böschungen im Rottetunnel: Einfluss auf die Haufwerksdurchströmung mit qualitativen Verlauf des Durchströmwiderstandes (links) und Beispiel am Tunnelort (rechts)	89
Abb. 6-22: Böschungen im Rottetunnel: Einfluss der Randgängigkeitszone am Boden auf die Haufwerksdurchströmung	90
Abb. 6-23: Einfluss von Böschungen auf das Temperaturfeld im Reaktor (Versuch ausgebaute Umluftleitung).....	91
Abb. 6-24: Heterogenität im Prozessverlauf (GA 6)	93
Abb. 6-25: Rotteraktor vor (links) und nach einer Materialumsetzung (rechts)	94
Abb. 6-26: Heterogenität vor (links) und nach einer Umsetzung (rechts) (TM 7)	95
Abb. 6-27: Verteilung der den Verläufen zugeordneten Kategorien der Stechertemperatur.....	96
Abb. 6-28: Wasseraustrag, Wasserfreisetzung und Wassergehalt je Abbaugrad.....	98
Abb. 6-29: Einfluss eines hohen Anfangswassergehaltes auf den Prozessverlauf: Haufwerkstemperaturen im ersten (links) und zweiten Rotteschritt (rechts) (TM 8).....	99
Abb. 6-30: Anfangswassergehalt und Sättigungswassergehalt (Wasserkapazität) sowie Anteil des Anfangs- am Sättigungswassergehalt von verschiedenen Chargen Rottegut.....	101
Abb. 6-31: Sprühprofil kenntlich an den Reaktorwänden (links: Beliebige Stelle, Mitte: Böschung am Tunnelort) und als Schema im Tunnelquerschnitt (rechts) [Wanka, 2011]	103
Abb. 7-1: Konditionierung der Zuluft (ZL) durch Mischung von Frisch (FL)- und Umluft (UL)	105
Abb. 7-2: Trockenluftbedarf zur Wärmeabfuhr von 20 MJ/kg _{oTS} bei Einsatz von Frischluft (links), Mischluft (Mitte) und Mischluft mit Kondensator (rechts). Angaben in [kg _{trL} /kg _{oTS}]	108
Abb. 7-3: Theoretischer Zustand der Differenzdruckverläufe und -niveaus am Rotteraktor.....	109
Abb. 7-4: Zeitlicher Druckverlauf Einzeltunnel: Abluftraum, Abluftsammeleleitung, Frischluftsammeleleitung, Belüftungsraum (oben) und wichtige Tunnelbetriebsdaten (unten) (DME 11).....	109
Abb. 7-5: Jalousieklappe demontiert und gereinigt. Links: geschlossen, Rechts: geöffnet [Umbach, 2011]	110
Abb. 7-6: Frischluftklappe demontiert [IVU, o.J.]	110
Abb. 7-7: Strömungswege zwischen den Luftsammeleleitungen.....	112

Abb. 7-8:	Falschlufweg zwischen zwei Rottetunneln durch Luftsammelleitungen.....	112
Abb. 7-9:	Beeinflussung der CO ₂ -Konzentration im Haufwerk durch Falschluf (GA 5)...	113
Abb. 7-10:	Druckgradient in Abhängigkeit der Tunnellage: Druckdifferenz zwischen Abluftraum und Abluftsammelleitung [Umbach, 2011].....	114
Abb. 7-11:	Haufwerkstemperatur ermittelt mit Stecherthermometer und Sonden (TM 4, 1.).....	115
Abb. 7-12:	Temperaturprofil im Rotteguthaufwerk an der Position der Stecherthermometer für sechs untersuchte Rottereaktoren	116
Abb. 7-13:	Haufwerkstemperaturen und wichtige Betriebsdaten bei korrigierter (höherer) Positionierung der Stecherthermometer (TM 11, 1.)	117
Abb. 7-14:	Örtliche CO ₂ -Konzentration und Haufwerkstemperatur bei konstanten Belüftungsbedingungen (GA 5).....	118
Abb. 7-15:	Schematische Darstellung zur Zusammensetzung der integralen Stoffmengenkonzentration in der Abluft (links: Reaktorquerschnitt, rechts: Längsschnitt)	119
Abb. 7-16:	Regelkreis einer MBA-Anlage für die Prozessregelung	120
Abb. 7-17:	Regelmechanismus der Stecherthermometer (TM 10, 1.).....	120
Abb. 7-18:	„Überschwingen“ in der Anfangsphase des Rotteprozesses (TM 11, 2.).....	121
Abb. 7-19:	Verzögerung und „Überschwingen“ im Rotteprozess (TM 2)	121
Abb. 8-1:	Konzeptionsbedingte und konstruktive Merkmale statischer Rottereaktoren....	123
Abb. 8-2:	Probleme statischer Rottereaktoren (Rote Umrandung: konzeptionsbedingt) ..	124
Abb. 8-3:	Methoden zur Bewertung des Prozesszustandes in statischen Rottereaktoren	126
Abb. 8-4:	Probleme aufgedeckt durch Stecherthermometer (GA 3, GA 6, TM 18)	127
Abb. 8-5:	Probleme statischer Rottereaktoren und Maßnahmenpakete zur Ertüchtigung	130
Abb. 8-6:	Konstruktive Merkmale statischer Rottereaktoren und Maßnahmen zur Ertüchtigung mit Einordnung nach dem Aufwand zur Realisierung (niedrig (-), mittel (o), hoch (+))	132
Abb. 8-7:	Varianten zur Integration der Homogenisierung vor dem ersten Rotteschritt ...	133
Abb. 8-8:	Materialmanagement im Anlieferungsbereich einer MBA-Anlage im Istzustand (links) und als Ertüchtigungsmaßnahme zur Homogenisierung (rechts)	134
Abb. 8-9:	Begegnung der Randgängigkeit im Rottereaktor: Reaktorquerschnitt (links), Reaktorlängsschnitt am Tunnelor (Mitte), Reaktorquerschnitt erweiterte Variante (rechts).....	140
Abb. 8-10:	Betriebsverhalten mit modifiziertem Belüftungsboden (Ausschnitt GA 15).....	142
Abb. 8-11:	Betriebsverhalten mit modifiziertem Belüftungsboden (GA 9)	143
Abb. 8-12:	Betriebsverhalten bei verringerter Schütthöhe (TM 12, 1.).....	145
Abb. 8-13:	Einfluss einer dynamischen Prozessführung auf die Heterogenität (GA 7)	147
Abb. 8-14:	Rottetunnel mit segmentiertem Belüftungsraum, Variante 1 (schematisch)	149
Abb. 8-15:	Rottetunnel mit segmentiertem Belüftungsraum, Variante 2 (schematisch): Längsschnitt und Querschnitt (oben) und Draufsicht (unten)	150
Abb. 8-16:	Rottetunnel nach einer schichtenweisen Beschickung.....	151
Abb. 8-17:	Trennung der Rottereaktoren von der Frischluftsammelleitung	152
Abb. 8-18:	Trennung der Rottereaktoren von der Abluftsammelleitung	152
Abb. 8-19:	Stoffströme bei der Restabfallbehandlung	153
Abb. 8-20:	Grundkonzeption neuer MBA-Anlagen	154
Abb. 8-21:	Konzeption einer MBA-Anlage mit Drehrohrreaktor	155

Abb. A-1:	Benutzeroberfläche des Programms zur Steuerung der automatisierten Gasanalyse	173
Abb. A-2:	Wassergehalt verschiedener Chargen Rottegut (Untersuchungen Durchströmsäule und Wasseraufnahmevermögen)	174
Abb. A-3:	Temperatur und CO ₂ -Konzentration im Rottegut im Querschnitt des Rottetunnels bei Frischluftbetrieb (CO ₂ im Belüftungsraum Null): Stelle u 0,9 m und Stelle o 1,8 m über dem Belüftungsboden, M nahe am Stecher 1, RM zwischen Stecher und Wand, R 40 cm von Wand entfernt) [unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse an MBA-Anlage A aus 10/2009].	174
Abb. A-4:	Median der Stecherthermometer (Betriebsdaten aus 2009, Januar bis Mitte Juli).....	174
Abb. A-5:	Median der Stecherthermometer (Betriebsdaten aus 2010, Januar bis Mitte Juli).....	175
Abb. A-6:	Druck im Abluftkanal (links) und im Zuluftkanal (rechts) bei Veränderung der Leistung des Ventilators per FU-Änderung in verschiedenen Versuchen.....	175
Abb. A-7:	Temperaturen außen und in den Sammelleitungen für Abluft und Frischluft....	175
Abb. A-8:	Verteilung der den Chargen zugeordneten Kategorien der Ablufttemperatur gemäß Tab. A-5.....	178
Tab. 4-1:	Literaturdaten zur Wärmefreisetzung (gerundet) bei Rotteprozessen	37
Tab. 4-2:	Literaturdaten zum Minimum und Optimum beim Wassergehalt in Rotteprozessen	40
Tab. 4-3:	Literaturdaten zur Wasserkapazität von organischem Material	41
Tab. 4-4:	Literaturdaten zum minimalen Sauerstoffgehalt in der Abluft bei Rotteprozessen	45
Tab. 4-5:	Literaturdaten zu Belüftungsraten zur Deckung des Sauerstoffbedarfs.....	46
Tab. 6-1:	Merkmalsabhängige Einordnung der Stechertemperaturen in Kategorien	96
Tab. 7-1:	Enthalpie (Bezugszustand $\vartheta = 0\text{ °C}$, $h = 0\text{ kJ/kg}$) von Luftströmen.....	107
Tab. 8-1:	Ergebnisse von Untersuchungen zur Durchströmbarkeit strukturierten Rottegutes	138
Tab. A-1:	Geräteliste.....	173
Tab. A-2:	Merkmale zur Bewertung der Betriebsdaten.....	176
Tab. A-3:	Zusammenfassung von Merkmalen zu Merkmalsklassen.....	176
Tab. A-4:	Beispielhafter Temperaturverlauf der Stechertemperaturen zur Einordnung in Kategorien	177
Tab. A-5:	Merkmalsabhängige Einordnung der Ablufttempera-turen in Kategorien	178
Tab. A-6:	Auswertung von Betriebsdaten aus 2010 bezüglich Standardabweichung und Median und Einteilung in Winter- und Frühjahrquartal	178
Tab. A-7:	Übersicht Untersuchungen Kontinuierliche Temperaturmessung Rottetunnel .	179
Tab. A-8:	Übersicht Untersuchungen Durchströmung an der Durchströmsäule - unmodifiziert.....	179
Tab. A-9:	Übersicht Untersuchungen Durchströmung an der Durchströmsäule - modifiziert.....	180
Tab. A-10:	Übersicht Untersuchungen Kontinuierliche Gasanalyse Rottetunnel	180
Tab. A-11:	Übersicht Untersuchungen Druckmessungen Einzeltunnel	181
Tab. A-12:	Übersicht Untersuchungen Druckmessungen benachbarter Tunnel 7/8	181

Anhang

A.1 Dokumentation zur Messtechnik

Tab. A-1: Geräteliste

Gerät	Spezifikation
Druckaufnehmer	Oppermann GmbH Differenzdruck-Transmitter M 984.3.4.3.1, Messbereich 0 – 2,5 kPa
Membranpumpe	SECOH EL-S 100, Volumenstrom bei 0 bar: 152 l/min
Durchflussmesser	Bronkhorst Mass-View MV-306, Messbereich 0,4 - 200 l/min
Thermoelemente	NiCr-Ni, Typ K, Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH
Datenlogger	Wuntronic GmbH MS5, frei konfigurierbar
Gaskühler	M&C Techgroup ECP-1000G
Gasanalysator Manuell	Saxon Junkalor Infralyt 4000 oder 5000
Gasanalysator Automatik	Saxon Junkalor Infralyt 40 E
3-Wege-Quetschventil	Zimmer Automation Typ S307 06-Z 130A
Peltierkühler	Telemeter Electronic TEK-35-2-RR-24
Rechner Umschaltsystem	Fujitsu DS_D2963-S11
Steuereinheit Druck	Graphtec Datenlogger GL200A

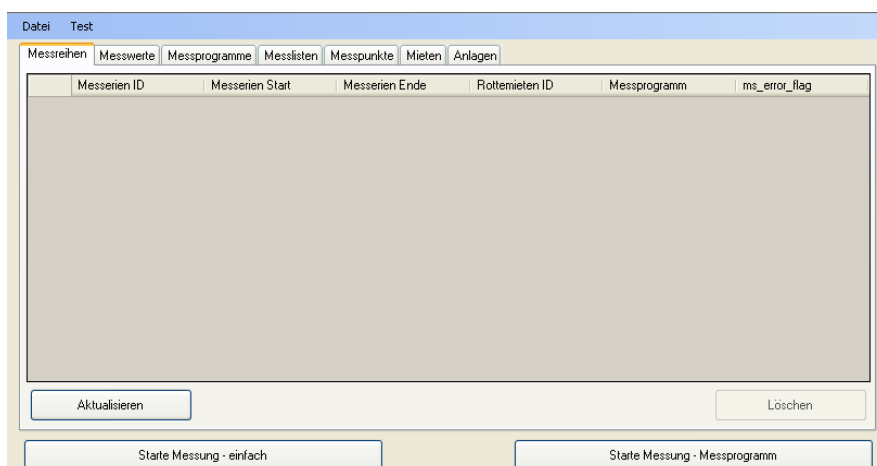


Abb. A-1: Benutzeroberfläche des Programms zur Steuerung der automatisierten Gasanalyse [Saczkinski, 2012]

A.2 Wassergehalt

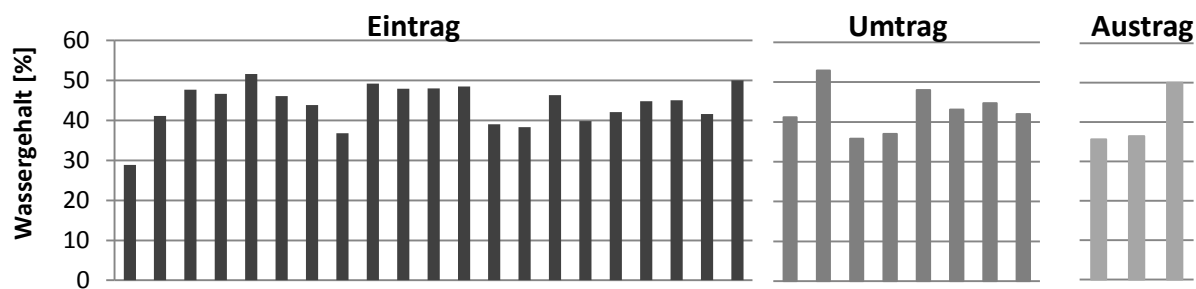


Abb. A-2: Wassergehalt verschiedener Chargen Rottegut (Untersuchungen Durchströmsäule und Wasseraufnahmevermögen)

A.3 Randgängigkeit

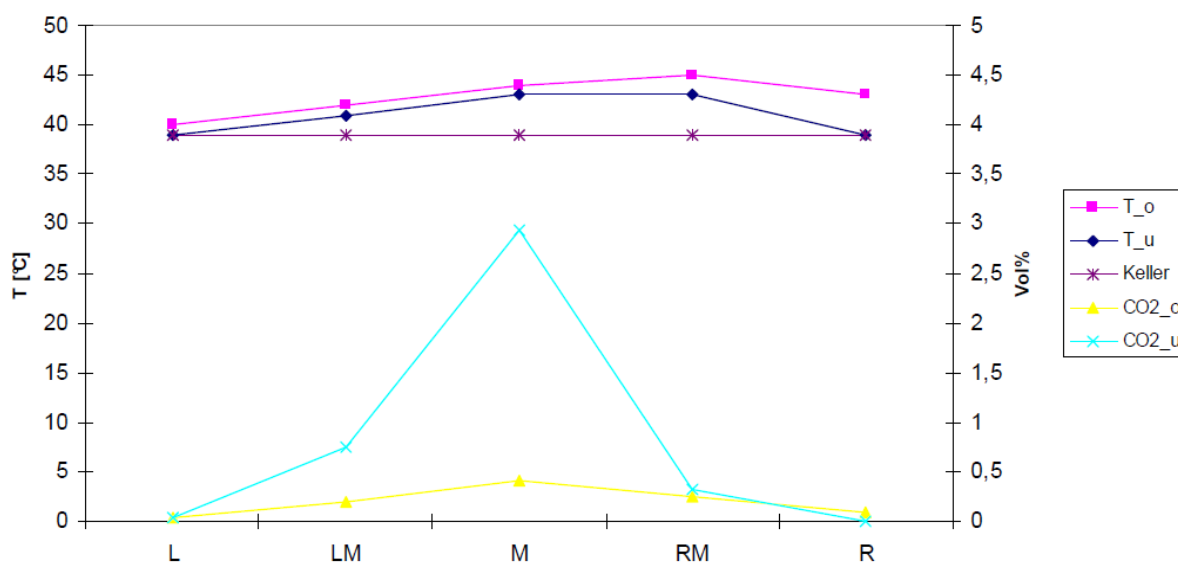


Abb. A-3: Temperatur und CO_2 -Konzentration im Rottegut im Querschnitt des Rottetunnels bei Frischluftbetrieb (CO_2 im Belüftungsraum Null): Stelle u 0,9 m und Stelle o 1,8 m über dem Belüftungsboden, M nahe am Stecher 1, RM zwischen Stecher und Wand, R 40 cm von Wand entfernt) [unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse an MBA-Anlage A aus 10/2009]

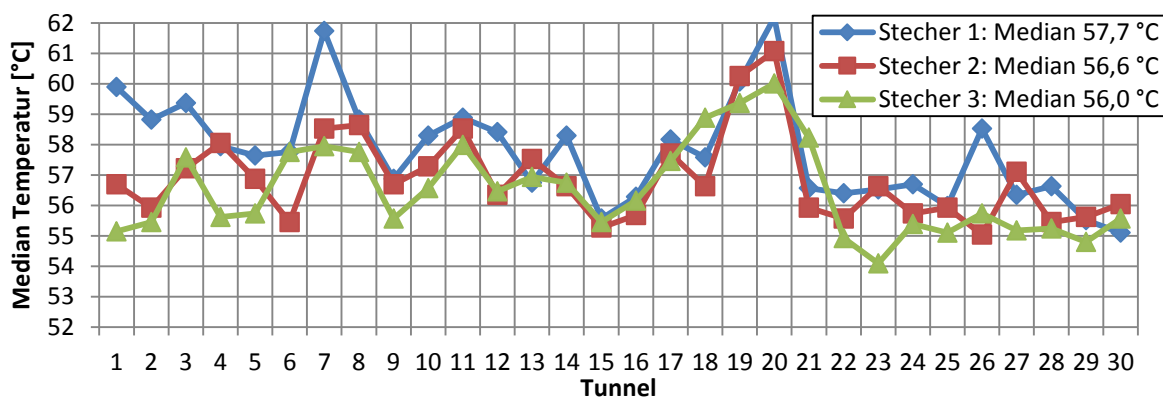


Abb. A-4: Median der Stecherthermometer (Betriebsdaten aus 2009, Januar bis Mitte Juli)

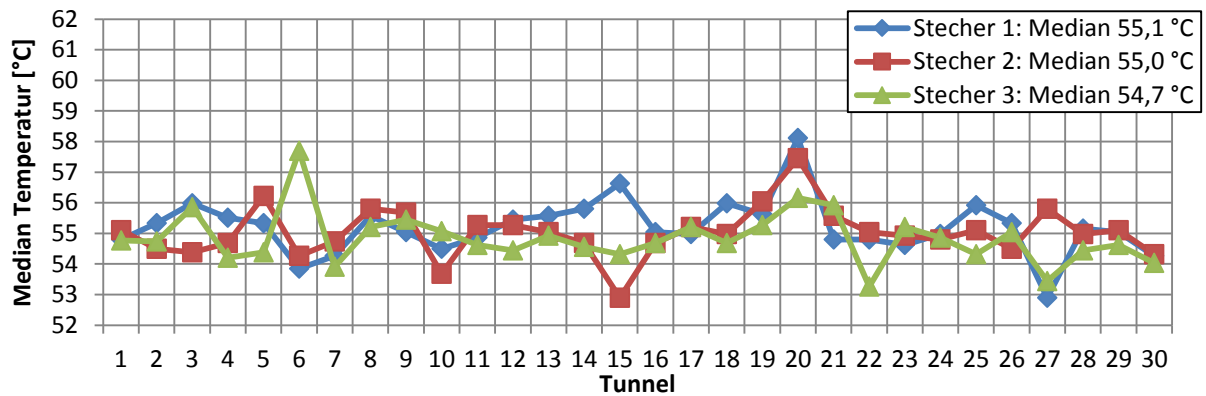


Abb. A-5: Median der Stecherthermometer (Betriebsdaten aus 2010, Januar bis Mitte Juli)

A.4 Luftmanagement

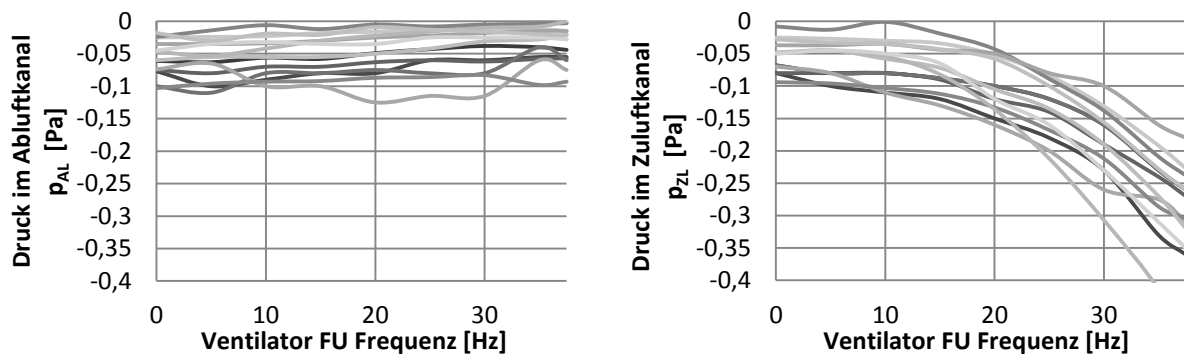


Abb. A-6: Druck im Abluftkanal (links) und im Zuluftkanal (rechts) bei Veränderung der Leistung des Ventilators per FU-Änderung in verschiedenen Versuchen

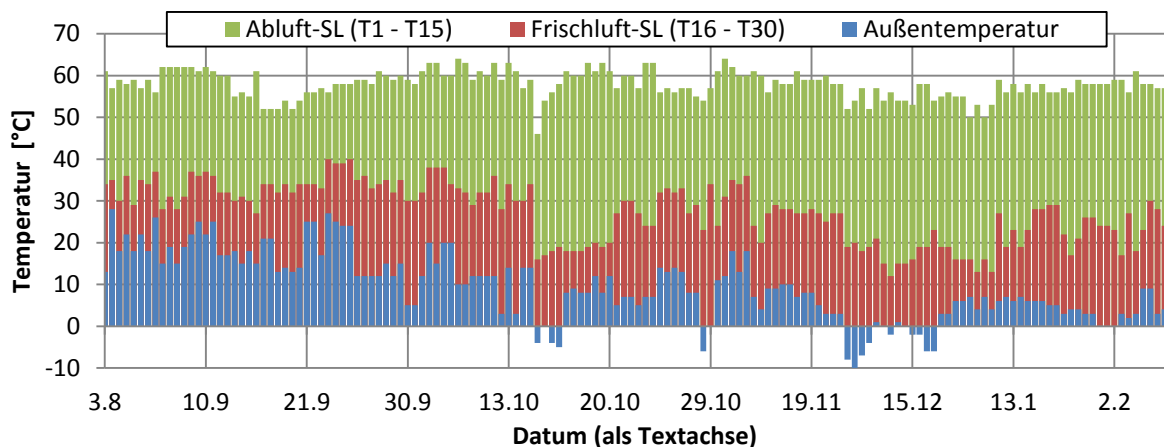


Abb. A-7: Temperaturen außen und in den Sammelleitungen für Abluft und Frischluft

Bei der Temperatur in der Abluft-Sammelleitung wurde aufgrund der größeren vorliegenden Datenmenge die Tunnelreihe T1 - T15 gewählt. Zur Reihe T16 - T30 gab es keine signifikanten Unterschiede. Die Messstellen in der Frischluft-Sammelleitung wurden aus technischen Gründen in der Tunnelreihe T16 - T30 positioniert. Wegen eines längeren Strömungsweges lag ein geringer systematischer Unterschied zu T1 - T15 vor.

A.5 Auswertung Betriebsdaten

Tab. A-2: Merkmale zur Bewertung der Betriebsdaten

Merkmal	Beschreibung
M 1	Alle drei Stecher haben den gleichen Verlauf (< 5°C Abweichung)
M 2	Gleicher Verlauf der Stecher aber deutliche Abweichungen untereinander (> 5°C)
M 3	Ein einzelner Stecher zeigt einen deutlich anderen Verlauf
M 4	Alle drei Stecher haben einen unterschiedlichen Verlauf
M 5	Horizontaler Verlauf aller Stechertemperaturen
M 6	Kontinuierlicher Anstieg aller Stechertemperaturen
M 7	Kontinuierlicher Abfall aller Stechertemperaturen
M 8	Verlauf aller Stechertemperaturen verändert sich über der Zeit (wechselnder Abfall und Anstieg)
M 9	Einzelne oder alle Stechertemperaturen zeitweise oberhalb 70°C
M 10	mittlere Stechertemperatur zwischen 50 und 60°C
M 11	mittlere Stechertemperatur oberhalb 60°C
M 12	mittlere Stechertemperatur unterhalb 50°C
M 13	Differenzen der Stechertemperaturen nehmen zu
M 14	Differenzen der Stechertemperaturen nehmen ab
M 15	Verlauf der Ablufttemperatur entspricht dem der Stechertemperaturen
M 16	Ablufttemperatur entspricht in etwa der mittleren Stechertemperatur
M 17	Ablufttemperatur liegt immer oder zeitweise deutlich über den Stechertemperaturen
M 18	Ein Stecher liegt zeitweise oberhalb der Ablufttemperatur
M 19	Deutlicher stündlicher Abfall der Ablufttemperatur (bis 20 K) infolge der Bewässerung aller 8 bzw. 12 h (Differenz Abluft-Zuluft negativ)

Tab. A-3: Zusammenfassung von Merkmalen zu Merkmalsklassen

Klasse	Merkmale
1	M1,M5,M10
2	M1,M8
3	M2,M5,M10
4	M2,M8
5	M3,M5,M10
6	M3,M8
7	M1,M6
8	M1,M7
9	M4
10	M2,M6
11	M2,M7
12	M3,M6
13	M3,M7
14	M2,M5,M12

Tab. A-4: Beispielhafter Temperaturverlauf der Stechertemperaturen zur Einordnung in Kategorien

Kategorie	Beschreibung	Beispielhafter Temperaturverlauf
S 1	normale Temperaturverläufe: etwa 55°C, wenige Schwankungen	<p>Graph S 1: Temperature [°C] vs. Rottedauer [d]. The y-axis ranges from 0 to 80 in increments of 10. The x-axis ranges from 0 to 14 in increments of 2. Three data series are plotted: Stecher 1 (blue diamonds), Stecher 2 (red diamonds), and Stecher 3 (green diamonds). All three series start at approximately 40°C at day 0, rise to about 60°C by day 1, and then remain relatively stable between 50°C and 60°C until day 12, after which they all drop to around 35°C by day 14.</p>
S 2	große Schwankungen über der Zeit, aber Stechertemperaturen untereinander ähnlich	<p>Graph S 2: Temperature [°C] vs. Rottedauer [d]. The y-axis ranges from 0 to 80 in increments of 10. The x-axis ranges from 0 to 14 in increments of 2. Three data series are plotted: Stecher 1 (blue diamonds), Stecher 2 (red diamonds), and Stecher 3 (green diamonds). The curves show high-frequency fluctuations throughout the 14-day period, with temperatures generally staying between 30°C and 60°C. The three series are closely clustered together.</p>
S 3	alle drei Stechertemperaturen unterschiedlich	<p>Graph S 3: Temperature [°C] vs. Rottedauer [d]. The y-axis ranges from 0 to 80 in increments of 10. The x-axis ranges from 0 to 14 in increments of 2. Three data series are plotted: Stecher 1 (blue diamonds), Stecher 2 (red diamonds), and Stecher 3 (green diamonds). Stecher 1 starts at ~40°C, rises to ~70°C by day 6, and stays there until day 14. Stecher 2 starts at ~40°C, rises to ~60°C by day 6, and stays there until day 14. Stecher 3 starts at ~40°C, rises to ~50°C by day 6, and then drops to ~20°C by day 14.</p>
S 4	eine Stechertemperatur deutlich abweichend	<p>Graph S 4: Temperature [°C] vs. Rottedauer [d]. The y-axis ranges from 0 to 80 in increments of 10. The x-axis ranges from 0 to 14 in increments of 2. Three data series are plotted: Stecher 1 (blue diamonds), Stecher 2 (red diamonds), and Stecher 3 (green diamonds). Stecher 1 and Stecher 2 start at ~45°C, rise to ~55°C by day 6, and stay there until day 14. Stecher 3 starts at ~45°C, rises to ~55°C by day 6, and then continues to rise to ~65°C by day 14.</p>

Tab. A-5: Merkmalsabhängige Einordnung der Ablufttemperaturen in Kategorien

Kategorie	Beschreibung
AL 0	keine Aussage zum Verlauf im Vergleich mit den Stechern möglich
AL 1	Verlauf gleich und kaum Abweichung von den Stechern ($\Delta T < 5$ K)
AL 2	Verlauf gleich aber immer deutliche Abweichung nach oben ($5 < \Delta T < 10$ K)
AL 3	Verlauf mit Abweichung nach oben zu Beginn, dann Annäherung an Stecher oder der umgekehrte Fall

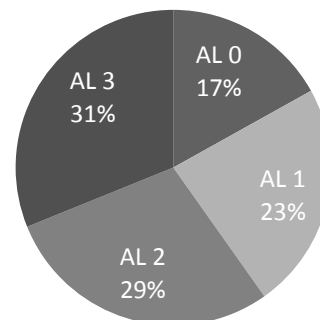
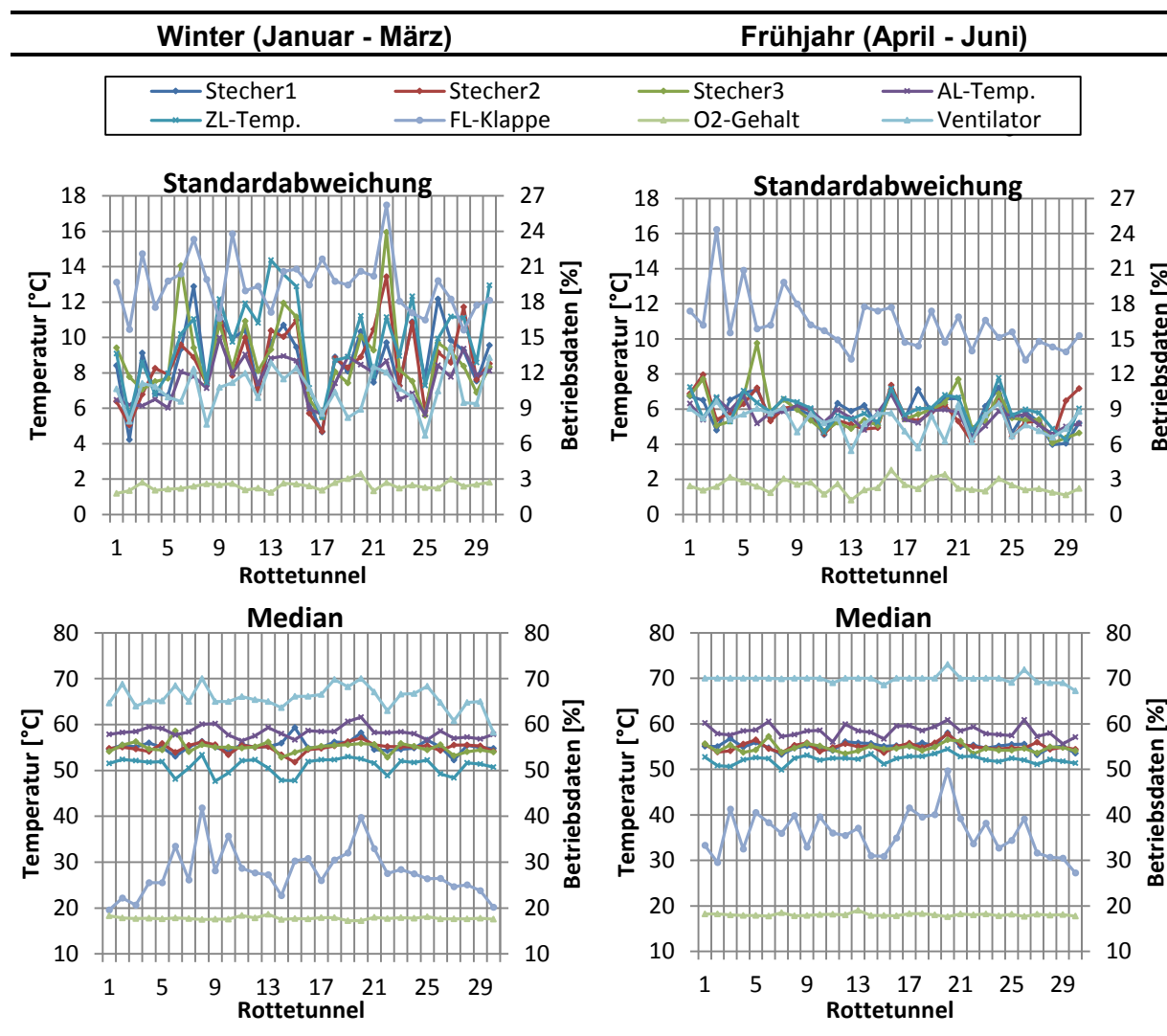


Abb. A-8: Verteilung der den Chargen zugeordneten Kategorien der Ablufttemperatur gemäß Tab. A-5

Tab. A-6: Auswertung von Betriebsdaten aus 2010 bezüglich Standardabweichung und Median und Einteilung in Winter- und Frühjahrsquartal



A.6 Übersicht Untersuchungen

Tab. A-7: Übersicht Untersuchungen Kontinuierliche Temperaturmessung Rottetunnel

Ver-such	Zeitraum	1. Rotte-Schritt Tunnel	2. Rotte-Schritt Tunnel	Modifizierung
TM 1	21.07.2010 – 10.08.2010	13	21	-
TM 2	13.08.2010 – 19.08.2010	3	-	-
TM 3	25.08.2010 – 08.09.2010	20	28	-
TM 4	01.09.2010 – 16.09.2010	2	13	-
TM 5	08.09.2010 – 14.09.2010	10	-	-
TM 6	15.09.2010 – 01.10.2010	29	16	-
TM 7	16.09.2010 – 06.10.2010	27	3	-
TM 8	06.10.2010 – 26.10.2010	1	9	Stecherhöhe
TM 9	06.10.2010 – 27.10.2010	16	10	Stecherhöhe
TM 10	28.10.2010 – 15.11.2010	29	27	Stecherhöhe
TM 11	10.11.2010 – 01.12.2010	7	17	Stecherhöhe
TM 12	18.11.2010 – 18.12.2010	27	26	Stecherhöhe + Schütthöhe
TM 13	08.12.2010 – 28.12.2010	26	15	Stecherhöhe + Schütthöhe
TM 14	09.12.2010 – 28.12.2010	24	3	Stecherhöhe + Schütthöhe
TM 15	06.01.2011 – 25.01.2011	4	17	Stecherhöhe + Belüftungsboden
TM 16	06.01.2011 – 27.01.2011	1	18	Stecherhöhe + Belüftungsboden
TM 17	26.01.2011 – 16.02.2011	17	19	Stecherhöhe + Belüftungsboden
TM 18	01.02.2012 – 15.02.2012	-	11	-

Tab. A-8: Übersicht Untersuchungen Durchströmung an der Durchströmsäule - unmodifiziert

Ver-such	Zeitraum	Tunnel	Material	x	Masse	Schütt-dichte	Schütt-höhe	Setz-ung
				[%]	[kg]	[kg/m³]	[cm]	[cm]
DS 1	03.08. – 12.08.2010	8	Eintrag	29	207	403	290	41
DS 2	12.08. – 24.08.2010	3	Eintrag	41	291	566	290	38
DS 3	25.08. – 01.09.2010	20	Eintrag	48	306	656	264	28
DS 4	01.09. – 08.09.2010	2	Eintrag	47	313	616	287	40
DS 5	08.09. – 15.09.2010	13	Umtrag	41	279	550	286	30
DS 6	16.09. – 23.09.2010	27	Eintrag	52	332	660	284	35
DS 7	23.09. – 05.10.2010	3	Umtrag	53	364	708	290	25
DS 8	06.10. – 13.10.2010	16	Eintrag	46	310	604	290	39
DS 9	15.10. – 27.10.2010	10	Umtrag	36	203	395	290	31
DS 10	27.10. – 02.11.2010	29	Eintrag	44	280	546	290	39
DS 11	02.11. – 09.11.2010	29	Wie DS 10	55	327	710	260	33
DS 12	10.11. – 16.11.2010	7	Eintrag	37	274	534	290	39

Tab. A-9: Übersicht Untersuchungen Durchströmung an der Durchströmsäule - modifiziert

Ver- such	Zeitraum	Tunnel	Material	x [%]	Schütt- dichte [kg/m³]	Schütt- höhe [cm]
Schütthöhenveränderung					bei 290 cm	
DS 13	30.11. – 02.12.2010	24	Eintrag	49	552	290-140
DS 14	04.01. – 06.01.2011	2	Eintrag	48	509	290-140
DS 15	12.01. – 14.01.2011	13	Eintrag	48	577	290-140
Wassergehaltsveränderung						
DS 16	01.02. – 04.02.2011	15	Eintrag	39-54		

Tab. A-10: Übersicht Untersuchungen Kontinuierliche Gasanalyse Rottetunnel

Versuch	Tunnel	Art	Start	Ende	Start Messung	Ende Messung
GA 1	28	Eintrag	29.11.2011	06.12.2011	29.11.2011 16:38 30.11.2011 09:42 05.12.2011 16:47	29.11.2011 22:37 01.12.2011 19:54 06.12.2011 10:20
GA 2	4	Umtrag	06.12.2011	14.12.2011	06.12.2011 16:41	08.12.2011 03:07
GA 3	14	Eintrag	14.12.2011	21.12.2011	14.12.2011 13:38	17.12.2011 04:43
GA 4	28	Eintrag	21.12.2011	04.01.2012	25.12.2011 22:39 26.12.2011 17:13 28.12.2011 17:01 29.12.2011 16:29 30.12.2011 16:30 31.12.2011 16:29 01.01.2012 17:09 03.01.2012 16:30	26.12.2011 02:33 26.12.2011 21:53 29.12.2011 02:21 30.12.2011 11:56 30.12.2011 18:03 31.12.2011 18:03 01.01.2012 19:29 04.01.2012 08:52
GA 5	4	Eintrag	04.01.2012	18.01.2012	04.01.2012 15:00	18.01.2012 10:00
GA 6	18	Eintrag	18.01.2012	01.02.2012	18.01.2012 15:36	20.01.2012 16:40
GA 7	14	Umtrag	15.02.2012	08.03.2012	15.02.2012 17:17	19.02.2012 20:23
Abdeckung der Randbereiche						
GA 8	23	Eintrag	08.03.2012	21.03.2012	08.03.2012 16:53	21.03.2012 11:21
GA 9	1	Eintrag	22.03.2012	11.04.2012	22.03.2012 11:28	11.04.2012 09:56
GA 10	24	Eintrag	12.04.2012	26.04.2012	12.04.2012 15:48	20.04.2012 07:28
GA 11	14	Umtrag	26.04.2012	09.05.2012	26.04.2012 14:57	09.05.2012 08:33
GA 12	17	Umtrag	09.05.2012	23.05.2012	09.05.2012 14:46	11.05.2012 18:24
GA 13	27	Umtrag	23.05.2012	12.06.2012	23.05.2012 16:22	06.06.2012 12:18
GA 14	26	Umtrag	06.06.2012	20.06.2012	06.06.2012 15:02	19.06.2012 15:28
GA 15	30	Eintrag	20.06.2012	03.07.2012	20.06.2012 12:53	03.07.2012 10:08

Tab. A-11: Übersicht Untersuchungen Druckmessungen Einzeltunnel

Messreihe	Tunnel	Zeitraum	Rotteschritt
DME 1	7	02.02.2011 – 11.02.2011	1.
DME 2	7	14.02.2011 – 24.02.2011	1.
DME 3	7	24.02.2011 – 07.03.2011	1.
DME 4	1	07.03.2011 – 14.03.2011	1.
DME 5	1	15.03.2011 – 22.03.2011	1.
DME 6	1	23.03.2011 – 01.04.2011	1.
DME 7	16	23.03.2011 – 01.04.2011	1.
DME 8	16	01.04.2011 – 08.04.2011	1.
DME 9	1	04.04.2011 – 11.04.2011	1.
DME 10	16	12.04.2011 – 20.04.2011	1.
DME 11	12	12.04.2011 – 20.04.2011	1.
DME 12	12	21.04.2011 – 30.04.2011	1.
DME 13	28	21.04.2011 – 04.05.2011	1.
DME 14	12	01.05.2011 – 10.05.2011	1.
DME 15	28	05.05.2011 – 23.05.2011	2.
DME 16	20	11.05.2011 – 23.05.2011	1.

Tab. A-12: Übersicht Untersuchungen Druckmessungen benachbarter Tunnel 7/8

Messreihe	Zeitraum T7 und Rotteschritt		Zeitraum T8 und Rotteschritt	
30.11.2011 – 20.02.2012				
DMP 1	29.11.2011 – 07.12.2011	1.		
DMP 2	09.12.2011 – 20.12.2011	2.		
DMP 3	22.12.2011 – 10.01.2012	2.	20.12.2011 – 04.01.2012	2.
DMP 4	11.01.2012 – 19.01.2012	1.	05.01.2012 – 20.01.2012	2.
DMP 5	25.01.2012 – 09.02.2012	1.	02.02.2012 – 22.02.2012	2.
22.02.2011 – 27.02.2012				
DMP 6			24.02.2012 – 14.03.2012	2.
08.03.2011 – 20.04.2012				
DMP 7	07.03.2012 – 22.03.2012	2.	27.03.2012 – 12.04.2012	1.
DMP 8	17.04.2012 – 26.04.2012	2.	18.04.2012 – 27.04.2012	2.
26.04.2012 – 06.06.2012				
DMP 9	10.05.2012 – 22.05.2012	1.	30.04.2012 – 11.05.2012	2.
DMP 10	05.06.2012 – 21.06.2012	2.	15.05.2012 – 05.06.2012	2.
19.06.2012 – 03.07.2012				
DMP 11	22.06.2012 – 03.07.2012	2.	12.06.2012 – 20.06.2012	1.
DMP 12			29.06.2012 – 03.07.2012	2.